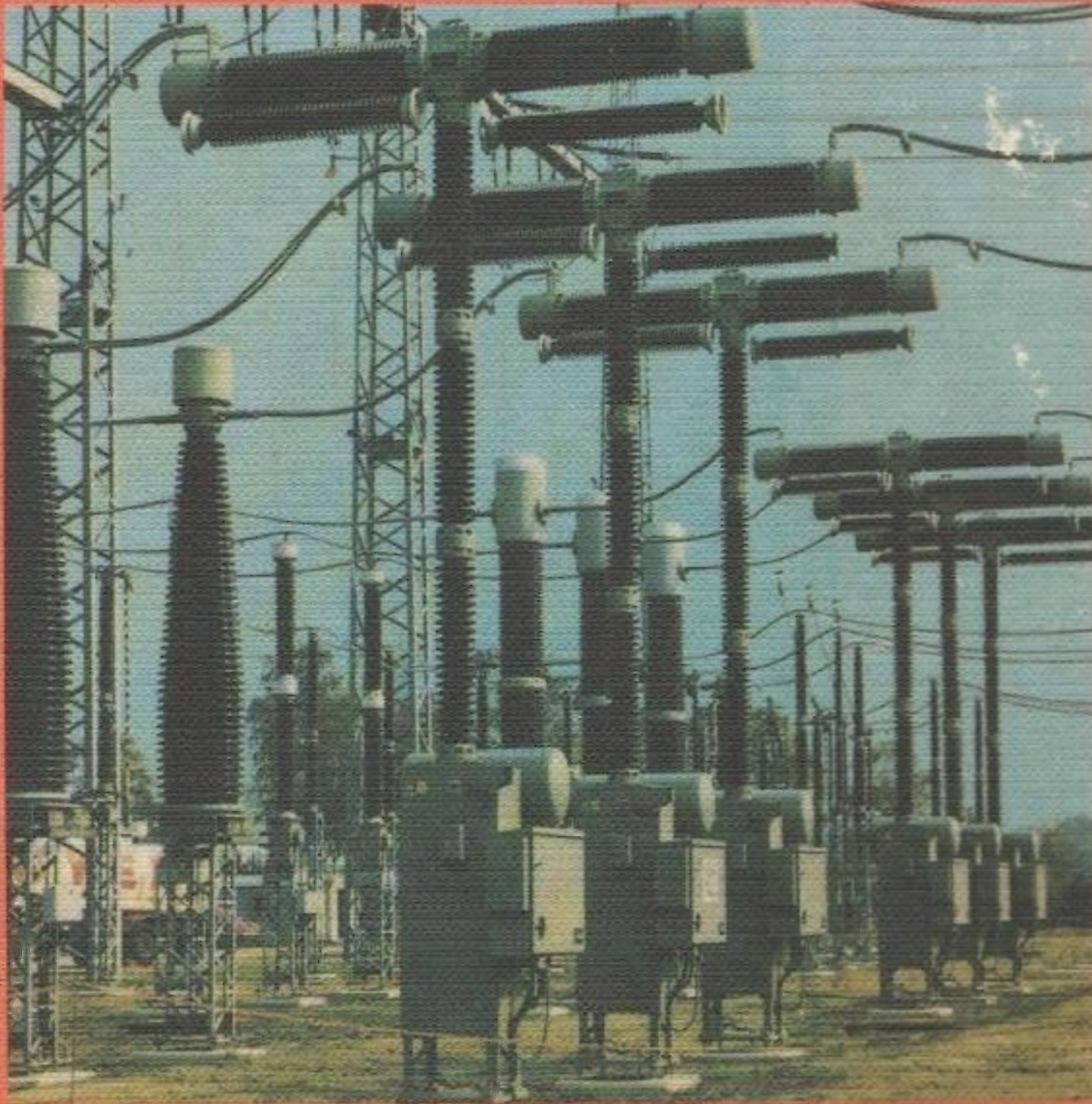




المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

أساسيات الكهرباء



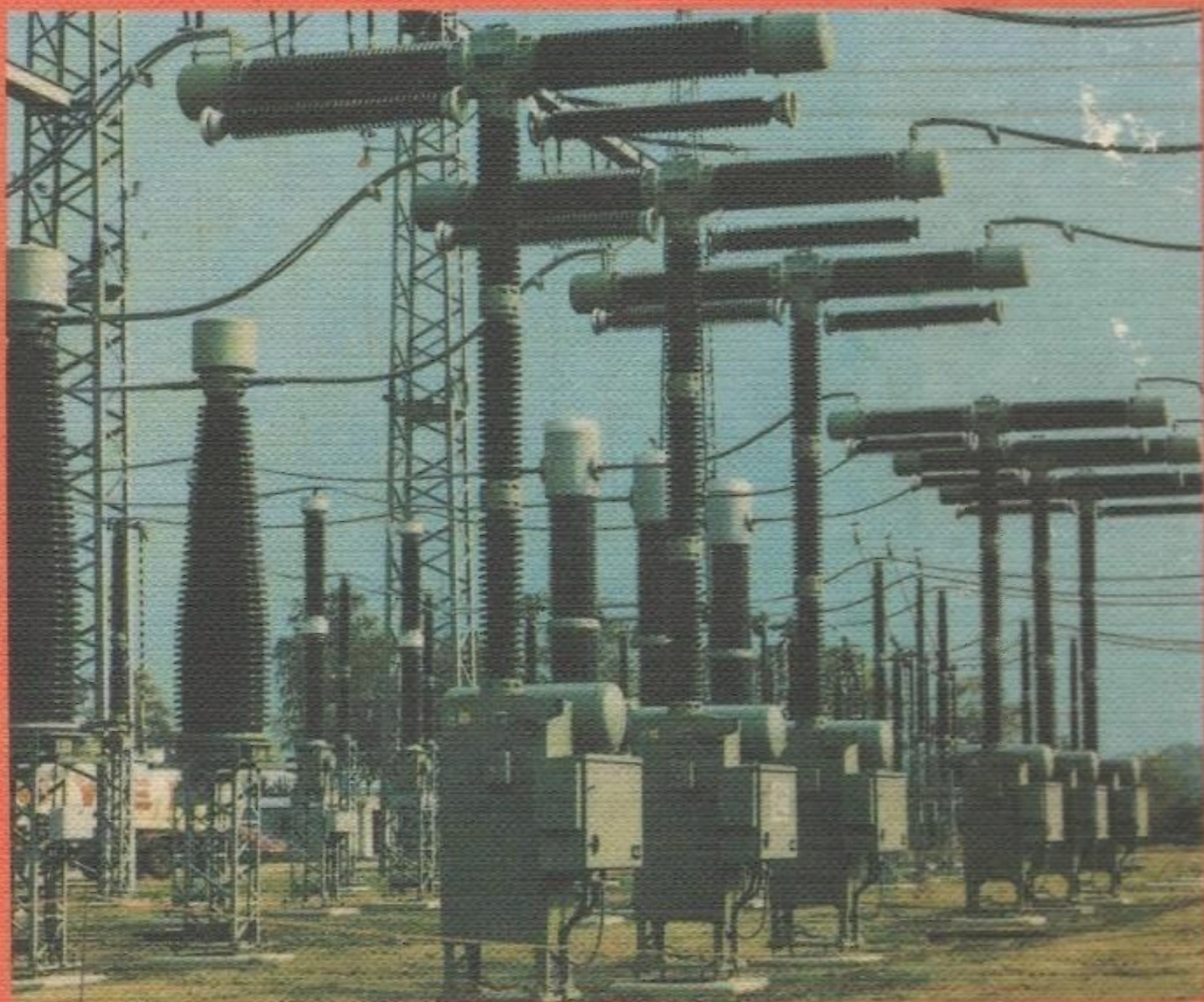
أساسيات الكهرباء

طبع على نفقة المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني - يوزع مجاناً ولا يباع



المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني

أساسيات الكهرباء



طبع على نفقة المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني - يوزع مجاناً ولا يباع



أساسيات الكهرباء

الحمد لله تعالى الذي تتم بنعمه الصالحات
لقد وفقت بتصوير النسخة اسكنر بصورة جديدة
وطباعة ممتازة

نسألكم الدعاء بظهر الغيب لي ولوالدي
اخوكم في الله أبو عبد الله عبد المهيمن فوزي

أساسيات الكهرباء

- Copyright of the Arabic edition for the Kingdom of Saudi Arabia as well as for all other countries exclusively by : General Organization for Technical Education and Vocational Training .
- حقوق الطبع باللغة العربية في المملكة العربية السعودية وفي جميع دول العالم الاخرى محفوظة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني .
- All rights reserved . No portion of this book may be reproduced in any form without written permission of the copyright holder .
- لا يجوز انتاج اي جزء من هذا الكتاب ، على اي شكل من الاشكال دون الحصول على تصريح كتابي من اصحاب حقوق الطبع .
- Translation and supervision over production & printing was done by (Al - Saif Translation House) by assignment of the General Organization for Technical Education and Vocational Training within the scope of the technical cooperation agreement between the Kingdom of Saudi Arabia and Japan.
- قامت بترجمة الكتاب ومراجعته والاشراف على الاخراج والطباعة دار السيف للترجمة بتكليف من المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني في اطار اتفاقية التعاون الفني بين المملكة العربية السعودية واليابان.

٥٣ / ٥٥ أ - أساسيات الكهرباء / ترجمة دار السيف للترجمة
١ ط - الرياض : المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني ١٤١٤ هـ / ١٩٩٤ م .
٤٩٦ ص ؛ سم .
ردمك × - ٠٠٤ - ١٢ - ٩٩٦٠
رقم ايداع ١٤ / ١٠٩٣
١ - الكهرباء . أ - دار السيف للترجمة ، مترجم

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مكتبة الخزانة

فهرست المحتويات

الموضوع	صفحة
تقديم	١٧
مقدمة	١٩
الفصل الأول : دوائر التيار المستمر	٢١
١ - ١ التيار والجهد الكهربائي	٢١
١ - ١ - ١ الالكترون والتيار الكهربائي	٢١
١ - ١ - ٢ الدوائر الكهربائية	٢٤
١ - ١ - ٣ الجهد الكهربائي والقوة الدافعة الكهربائية	٢٦
١ - ٢ حسابات دوائر التيار المستمر	٢٨
١ - ٢ - ١ قانون أوم	٢٨
١ - ٢ - ٢ الدوائر الكهربائية المركبة	٣٩
١ - ٣ المقاومة الكهربائية	٤٧
١ - ٣ - ١ مقاومة الموصل	٤٧
١ - ٣ - ٢ التوصيلية النوعية	٥١
١ - ٣ - ٣ الأنواع المختلفة للمقاومات	٥١
١ - ٣ - ٤ درجة الحرارة وتأثيرها على المقاومة	٥٥
١ - ٤ التأثير الحراري للتيار والقدرة الكهربائية	٦٠
١ - ٤ - ١ حرارة "جول"	٦٠
١ - ٤ - ٢ القدرة والطاقة الكهربائية	٦٢

٦٤	١ - ٤ - ٣ تطبيقات على حرارة "جول"
٦٦	١ - ٤ - ٤ أعلى تيار مسموح به
٦٦	١ - ٥ الظاهرة الكهروحرارية
٦٧	١ - ٥ - ١ تأثير سيبك
٧١	١ - ٥ - ٢ تأثير بلتيير
٧٢	١ - ٦ التأثير الكيمياءى للتيار الكهربائى والبطارية
٧٣	١ - ٦ - ١ المحلول الإلكتروليتى والأيونات
٧٤	١ - ٦ - ٢ قانون فاراداي
٧٧	١ - ٦ - ٣ البطاريات
٨٦	تعاريف

٨٩	الفصل الثانى : التيار الكهربائى والمغناطيسية
٩٠	٢ - ١ المغناطيس وقانون كولوم
٩٠	٢ - ١ - ١ المغناطيس والمغناطيسية
٩١	٢ - ١ - ٢ قانون كولوم
٩٣	٢ - ١ - ٣ الحث المغناطيسى
٩٤	٢ - ١ - ٤ المجال المغناطيسى وشدة المجال المغناطيسى
٩٧	٢ - ١ - ٥ خطوط القوى المغناطيسية
٩٩	٢ - ١ - ٦ الفيض المغناطيسى والحاجب المغناطيسى
١٠١	٢ - ٢ المجال المغناطيسى المتولد بواسطة التيار الكهربائى

- ١.١ ١ - ٢ - ٢ التيار الكهربائي والمجال المغناطيسي
- ١.٦ ٢ - ٢ - ٢ حساب المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الكهربائي
- ١١٧ ٢ - ٢ **الدائرة المغناطيسية**
- ١١٧ ١ - ٣ - ٢ الدائرة المغناطيسية والمقاومة المغناطيسية
- ١٢٣ ٢ - ٣ - ٢ كثافة الفيض المغناطيسي وشدة المجال المغناطيسي
- ١٢٥ ٣ - ٣ - ٢ منحني المغنطة والنفاذية
- ١٢٧ ٤ - ٣ - ٢ حلقة التخلف المغناطيسي (الهستيريسيس)
١٣. ٤ - ٢ **القوة الكهرومغناطيسية والحرك**
١٣. ١ - ٤ - ٢ القوة المؤثرة على تيار كهربائي في مجال مغناطيسي
- ١٣٧ ٢ - ٤ - ٢ القوة المؤثرة على موصلات يمر بها تيار
- ١٣٩ ٥ - ٢ **الحث الكهرومغناطيسي والمولد**
- ١٣٩ ١ - ٥ - ٢ الحث الكهرومغناطيسي
١٤. ٢ - ٥ - ٢ اتجاه وقيمة القوة الدافعة الكهربائية الحثية
- ١٤٤ ٣ - ٥ - ٢ مبادئ عمل المولد
- ١٤٧ ٤ - ٥ - ٢ التيار الدوامي
- ١٤٩ ٦ - ٢ **معامل الحث أو المحاثية**
- ١٤٩ ١ - ٦ - ٢ الحث الذاتي ومعامل الحث الذاتي
- ١٥١ ٢ - ٦ - ٢ معامل الحث الذاتي للملف
- ١٥٥ ٣ - ٦ - ٢ الحث المتبادل ومعامل الحث المتبادل
- ١٥٩ ٤ - ٦ - ٢ معامل الحث الذاتي ومعامل الحث المتبادل

١٦١ ٢ - ٦ - ٥ مبدأ عمل المحول (الترانسفورمر)

١٦٤ ٢ - ٦ - ٦ الطاقة المخزنة في ملف

١٦٧ ٢ - ٦ - ٧ قوة الجذب المغناطيسي

١٦٩

تعاريف

١٧١ الفصل الثالث : الكهرباء الساكنة

١٧١ ٢ - ١ - ١ كهرباء الاحتكاك وقانون كولوم

١٧١ ٣ - ١ - ١ التكهرب

١٧٢ ٢ - ١ - ٢ قانون كولوم

١٧٥ ٣ - ٢ المجال الكهربائي وخطوط القوى الكهربائية

١٧٥ ٣ - ٢ - ١ حث الكهرباء الساكنة وحجب الكهرباء الساكنة

١٧٨ ٣ - ٢ - ٢ المجال الكهربائي وشدة المجال الكهربائي

١٨٠ ٣ - ٢ - ٣ خط القوة الكهربائية والفيض الكهربائي

١٨٣ ٣ - ٢ - ٤ الجهد الكهربائي المطلق وفرق الجهد

١٨٤ ٣ - ٣ المكثف والسعة الكهروستاتيكية

١٨٤ ٣ - ٣ - ١ المكثف

١٨٦ ٣ - ٣ - ٢ السعة الكهروستاتيكية أو سعة الكهرباء الساكنة

١٨٧ ٣ - ٣ - ٣ الطاقة المخزنة في المكثف

١٨٩ ٣ - ٣ - ٤ قوة التجاذب الكهروستاتيكية

١٩١ ٣ - ٤ توصيل المكثفات

١٩١ ٣ - ٤ - ١ التوصيل على التوازي

١٩٣ ٣ - ٤ - ٢ التوصيل على التوالي

١٩٦ ٣ - ٥ ظاهرة التفريغ

١٩٦ ٣ - ٥ - ١ التفريغ

٢٠٠ ٣ - ٥ - ٢ تطبيقات على ظاهرة التفريغ

٢٠٤ تعاريف

٢٠٧ الفصل الرابع : دائرة التيار المتغير

٢٠٧ ٤ - ١ التيار المتغير ذو الموجة الجيبية

٢٠٧ ٤ - ١ - ١ توليد التيار المتغير ذي الموجة الجيبية

٢٠٩ ٤ - ١ - ٢ التعبير عن الزاوية والسرعة الزاوية

٢١١ ٤ - ١ - ٣ زمن الدورة والتردد

٢١٣ ٤ - ١ - ٤ قيمة التيار المتغير

٢١٥ ٤ - ١ - ٥ زاوية الطور وفرق زاوية الطور

٢١٧ ٤ - ١ - ٦ تجميع التيارات المتغيرة ذات الموجة الجيبية

٢٢٨ ٤ - ٢ الأعداد المركبة

٢٢٩ ٤ - ٢ - ١ العدد المركب وخواصه

٢٣٥ ٤ - ٢ - ٢ حاصل ضرب الأعداد المركبة وخارج قسمتها

٢٤١ ٤ - ٣ حساب الدائرة الكهربائية بطريقة الرموز

٢٤٢ ٤ - ٣ - ١ تمثيل التيار المتغير الجيبي بالأعداد المركبة

٢٤٤	٤ - ٣ - ٢ وظائف المقاومة والملف والمكثف في دائرة التيار المتغير الجيبي
٢٦٨	٤ - ٤ القدرة في دائرة التيار المتغير
٢٦٨	٤ - ٤ - ١ القدرة ومعامل القدرة في دائرة التيار المتغير
	٤ - ٤ - ٢ العلاقة بين القدرة الظاهرة والقدرة الفعالة وغير الفعالة
٢٧٣	في دائرة توالي RL
٢٧٥	٤ - ٥ التيار المتغير ثلاثي الأوجه
٢٧٥	٤ - ٥ - ١ التيار المتغير ثلاثي الأوجه
٢٧٩	٤ - ٥ - ٢ دائرة التيار المتغير ثلاثي الأوجه
٣٠١	٤ - ٥ - ٣ القدرة ثلاثية الأوجه
٣٠٣	٤ - ٦ المجال المغناطيسي الدوار
٣٠٤	٤ - ٦ - ١ المجال المغناطيسي الدوار المتولد من التيار المتغير ثلاثي الأوجه
٣٠٧	٤ - ٦ - ٢ محرك الحث
٣١٣	تعاريف

الفصل الخامس : الأشكال الموجية المختلفة

٣١٩	٥ - ١ موجة التيار المتردد غير الجيبية
٣٢٠	٥ - ١ - ١ مركبات موجة التيار المتغير (AC) غير الجيبية
٣٢١	٥ - ١ - ٢ توليد موجة التيار المتغير (AC) غير الجيبية
٣٢٣	٥ - ١ - ٣ توافقيات التيار المتغير ذي الموجة غير الجيبية
٣٢٥	٥ - ١ - ٤ القيمة الفعالة ومعامل التشويه للتيار المتغير ذي الموجة غير الجيبية

٣٢٨ ٥ - ١ - ٥ الأشكال الموجية المختلفة

٣٢٩ ٥ - ٢ الظاهرة العابرة الكهربائية

٣٣٠ ٥ - ٢ - ١ الظاهرة العابرة للدائرة RC

٣٣٣ ٥ - ٢ - ٢ الدائرة التفاضلية والدائرة التكاملية

٣٣٦ ٥ - ٢ - ٣ الظاهرة العابرة للدائرة RL

٣٣٩ تمارين

٣٤١ الفصل السادس : أشباه الموصلات والدوائر الإلكترونية

٣٤١ ٦ - ١ أشباه الموصلات والثنائي

٣٤١ ٦ - ١ - ١ الذرة والإلكترون

٣٤٣ ٦ - ١ - ٢ أشباه الموصلات

٣٤٧ ٦ - ١ - ٣ الثنائي (وصلة - pn)

٣٥١ ٦ - ١ - ٤ دائرة التقويم

٣٥٤ ٦ - ٢ الترانزستور

٣٥٤ ٦ - ٢ - ١ تركيب ومبدأ عمل الترانزستور

٣٥٨ ٦ - ٢ - ٢ تسمية وتوصيل الجهود إلى الترانزستور

٣٥٩ ٦ - ٢ - ٣ الخواص الاستاتيكية ومعامل h

٣٦٤ ٦ - ٢ - ٤ الدائرة المكافئة للترانزستور

٣٦٦ ٦ - ٣ دائرة الترانزستور

٣٦٦ ٦ - ٣ - ١ أساسيات دائرة التكبير

٣٦٩	٦ - ٣ - ٢ درجة التكبير والكسب
٣٧٣	٦ - ٣ - ٣ دائرة التكبير ذات التغذية الراجعة للتيار
٣٧٥	٦ - ٣ - ٤ دائرة مكبر القدرة
٣٧٧	٦ - ٣ - ٥ دائرة المذبذب
٣٨٤	٦ - ٤ العناصر المختلفة المصنوعة من أشباه الموصلات
٣٨٤	٦ - ٤ - ١ الأنواع المختلفة من الثنائيات
٣٨٦	٦ - ٤ - ٢ الأنواع المختلفة من الترانزستورات
٣٨٩	٦ - ٤ - ٣ الدائرة المتكاملة (IC)
٣٩٣	٦ - ٤ - ٤ الثايرستور
٣٩٥	٦ - ٤ - ٥ عناصر أخرى من أشباه الموصلات
٣٩٨	٦ - ٥ الدائرة المنطقية
٣٩٨	٦ - ٥ - ١ الدائرة المنطقية الأساسية
٤٠٠	٦ - ٥ - ٢ الدائرة المنطقية باستخدام الثنائي والترانزستور
٤٠٤	٦ - ٦ الحاسوب والدوائر المختلفة
٤٠٤	٦ - ٦ - ١ تركيب الحاسوب
٤٠٧	٦ - ٦ - ٢ الأعداد الثنائية والأعداد الست عشرية
٤١١	٦ - ٦ - ٣ دائرة التشغيل
٤١٤	تمارين

٧ - ١ أنواع ومكونات أنظمة التحكم

٤١٩ ٧ - ١ - ١ تركيب أنظمة التحكم

٤٢١ ٧ - ١ - ٢ التحكم المتتابع والتحكم بالتغذية الراجعة

٤٢٤ ٧ - ١ - ٣ المحس (جهاز الإحساس)

٤٢٨ ٧ - ١ - ٤ المحث (المحفز)

٤٣٢ ٧ - ١ - ٥ نظام المواجهة

٧ - ٢ التحكم الإلكتروني العملي

٤٣٨ ٧ - ٢ - ١ المعالج المتتابع

٣٩ تمارين**٤٤١ الفصل الثامن : أجهزة القياس الكهربائية****٤٤١ ٨ - ١ معالجة ومعايرة القيم المقاسة**

٤٤١ ٨ - ١ - ١ القياس والعيارية

٤٤٣ ٨ - ١ - ٢ معالجة القيم المقاسة

٤٤٧ ٨ - ٢ أجهزة القياس الكهربائية

٤٤٧ ٨ - ٢ - ١ أنواع أجهزة القياس الكهربائية

٤٤٨ ٨ - ٢ - ٢ أجهزة البيان

٤٥٦ ٨ - ٣ أجهزة القياس ذات المؤشر

٤٥٦ ٨ - ٣ - ١ جهاز قياس التيار المستمر

٤٦٢ ٨ - ٣ - ٢ جهاز قياس التيار المتغير (المتردد)

٤٦٥	٨ - ٤ أجهزة قياس القدرة (واطميتر)
٤٦٧	٨ - ٥ قياس المقاومة والحث والسعة الكهروستاتيكية
٤٦٧	٨ - ٥ - ١ قياس المقاومة
٤٧٠	٨ - ٥ - ٢ قياس الحث والسعة الكهروستاتيكية
٤٧١	٨ - ٦ قياس التردد
٤٧٢	٨ - ٦ - ١ جهاز قياس التردد ذو الريشة الهزازة (الرنانة)
٤٧٢	٨ - ٦ - ٢ جهاز قياس التردد المقسوم
٤٧٣	٨ - ٦ - ٣ عداد التردد
٤٧٥	٨ - ٧ الأوميتر
٤٧٦	٨ - ٧ - ١ جهاز الاختبار التمثيلي
٤٧٨	٨ - ٧ - ٢ جهاز الاختبار الرقمي
٤٧٨	٨ - ٨ راسم الذبذبات (CRT)
٤٧٩	٨ - ٨ - ١ التركيب وفكرة العمل
٤٨٢	٨ - ٨ - ٢ قياس شكل موجة الإشارة
٤٨٤	تعاريف
٤٨٧	ملحق : التفاضل والتكامل
٤٩٧	ملحق : المصطلحات الفنية

تقديم

لقد حدثت عبر التاريخ طفرات واكتشافات علمية ، حققت للانسان سبل ووسائل عيش أيسر في هذه الحياة . ولعل أهم تلك الاكتشافات العلمية ، ما حدث في مجال الكهرباء ، حتى إن الانسان المعاصر أصبح يعتمد في تسيير العديد من شئون حياته اليومية، على الآلات والأجهزة التي تشغل وتدار بالكهرباء ، فانتشرت الكهرباء في المصنع والمزرعة والمدرسة والمنزل ومرافق الحياة الأخرى .

وكتاب " أساسيات الكهرباء " نقدمه بين يديك - أخي الطالب - مساهمة في ذلك الركب منوهين في الوقت نفسه ، بالجهد السخي لوكالة اليابان للتعاون الدولي (جايكا) ، حيث قامت بتقديم الكتاب وترجمته من اللغة اليابانية إلى اللغة الانجليزية، في اطار التعاون الفني بين المملكة العربية السعودية واليابان .

وهذا الكتاب يقدم لك " أساسيات الكهرباء " مفاهيمها، دوائرها، رموزها ، ومعادلاتها ، حتى تستطيع أن تقتحم هذا المجال في مستقبل حياتك الدراسية ، وتتعلم في مساقات دراسية لاحقة تستطيع من خلالها سبر غور هذا العلم ، وتقديم ما يمكن أن تساهم به في منظومة البناء ، والتعمير ، والتطوير ، والتشييد ، الذي يشهده هذا البلد .

أسأل الله تعالى لك التوفيق والنجاح ،،

مدير عام التعليم الفني



الدكتور / علي بن ناصر الغفيص

الحمد لله تعالى الذي تتم بنعمه
الصالحات

لقد وفقت بتصوير النسخة اسكنر
بصورة جديدة وطباعة ممتازة
نسألكم الدعاء بظهر الغيب لي
ولوادي

اخوكم في الله أبو عبد الله
عبد المهيمن فوزي

مقدمة

تم إعداد هذا الكتاب الدراسى لطلبة أقسام الميكانيكا والكهرباء والالكترونيات وهندسة المعلومات فى المدارس الثانوية الهندسية، والذين سوف يدرسون مادة « أساسيات الكهرباء». والغرض من هذا الكتاب هو تمكين الطلبة من فهم أساسيات الهندسة الكهربائية وتطبيقاتها.

وفيما يلى بعض الملاحظات التى تم مراعاتها في إعداد هذا الكتاب :

(١) نظراً لإمكانية استخدام الكتاب فى أقسام الميكانيكا والصناعات الكيميائية والأقسام الأخرى بخلاف أقسام الكهرباء فقد روعى وضع المحتويات الأساسية المناسبة للموضوع مع تجنب الشرح النظرى المفصل . وعند الضرورة تتقدم المعالجة الكيفية على المعالجة الكمية .

(٢) تم تصميم الأمثلة الإيضاحية والأشكال بحيث تسهم فى فهم النص .

(٣) تم تزويد كل فصل بالأمثلة المحولة والأسئلة غير المحولة لتثبيت الفهم والتدريب على العمليات الحسابية .

(٤) للقراءات القصيرة، تم إضافة بعض الموضوعات المهمة مثل السيرة الذاتية لبعض العلماء والشروح والتعريفات للمصطلحات المستخدمة في المجال؛ مثل التوصيلية العالية و المحولات الخاصة .

(٥) تم شرح المبادئ الأساسية للأجهزة والمعدات الكهربائية مثل محرك التيار المستمر والمحولات فى فصل «التيار الكهربائي والمغناطيسية» والمحرك الحثي ثلاثي الأوجه، والمحرك الحثي ذو الوجه الواحد فى فصل «دائرة التيار المتغير» .

-
- (٦) فى فصل «أساسيات التحكم الالكترونى»، قمنابمعالجة النظرية الأساسية للتحكم، وشرح الحقائق الأساسية عن الأدوات الإلكترونية .
- (٧) فى فصل أجهزة القياس الكهربائي يحتوي النص على مبادئ عمل واستخدمات أجهزة القياس الأساسية .
- (٨) نظام الوحدات القياسية المستخدم فى الكتاب هو النظام العالمى للوحدات SI.
- (٩) المصطلحات الفنية تتفق مع كتاب : فهرس المصطلحات الأكاديمية للهندسة الكهربائية، نسخة منقحة من إعداد وزارة التعليم اليابانية والمواصفات الصناعية اليابانية (JIS).

الفصل الأول

دوائر التيار المستمر

DC circuits

يستخدم الكثير منا في حياته اليومية الأجهزة الكهربائية صغيرة القدرة التي تستعين بالبطاريات الجافة كمصدر للتيار المستمر لتغذيتها، ومثال ذلك أجهزة التسجيل المختلفة وماكينات الحلاقة الكهربائية وخلافه. والبطارية الجافة هي مصدر القدرة الذي يسبب مرور تيار مستمر، وتسمى « مصدر قدرة التيار المستمر ». كما تسمى الدوائر الكهربائية التي يغذيها التيار المستمر « دوائر التيار المستمر ». ودراسة أسلوب عمل دوائر التيار المستمر هو الأساس لدراسة غيرها من الدوائر الإلكترونية الأخرى .

حيث إن هناك دوائر إلكترونية مختلفة ، ولكن دائرة التيار المستمر هي القاعدة لجميع الدوائر الكهربائية، لذلك يجدر أن تكون هناك دراسة كافية لدائرة التيار المستمر من أجل دراسة الدوائر الكهربائية الأخرى واستيعاب الظواهر الكهربائية المختلفة .

وفي هذا الفصل سوف نتعرض لعناصر دوائر التيار المستمر من قدرة (P) ، وجهد (V) والتيار (I) ومقاومة (R) . كذلك سندرس قانون أوم الذي يحكم هذه العناصر . وأيضاً سوف نتعرض في هذا الفصل لظاهرتي الكهرباء الحرارية والتأثير الكيميائي للتيار الكهربائي.

١ - ١ التيار والجهد الكهربائي Electric current and voltage

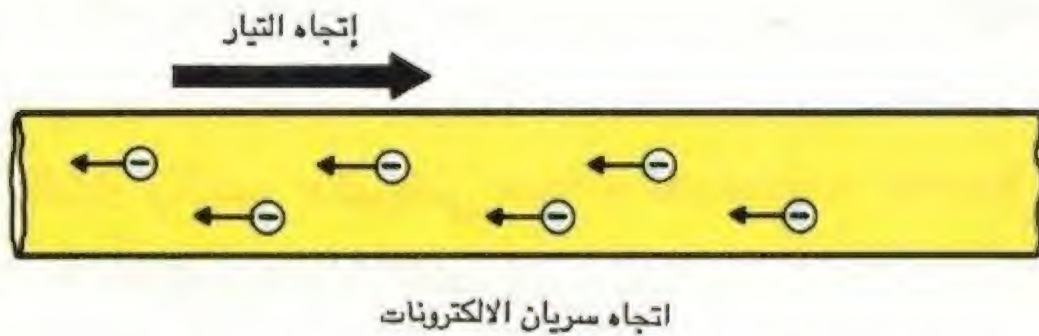
١ - ١ - ١ الإلكترون والتيار الكهربائي

تتكون المادة من ذرات ، وكل ذرة عبارة عن نواة ومجموعة من الإلكترونات تسبح في مدارات مختلفة حول هذه النواة. ويتكون الإلكترون من جسيم ذي شحنة سالبة ، بينما تتكون

النواة من جسيم البروتون ذي الشحنة الموجبة* بالإضافة إلى جسيم النيوترون المتعادل الشحنة. ولكي تكون الذرة متعادلة الشحنة؛ فإن مجموع شحنات الإلكترونات السالبة للذرة تساوي مجموع شحنات البروتونات الموجبة للذرة . وشحنة الإلكترون السالبة تعادل 1.6×10^{-19} كولوم **. والكولوم هو وحدة قياس كمية الكهرباء ، ويرمز له بالرمز C .

إن إلكترونات المدارات الخارجية للذرة تكون أقل التصاقاً بالنواة ، وأكثر حرية للخروج من هذه المدارات أو المسارات المحددة منها . وعند تعرض هذه الإلكترونات لطاقة خارجية قد تخرج عن مساراتها وتسمى إلكترونات حرة .

طبقاً لعطاء المواد للإلكترونات الحرة تنقسم المواد إلى مواد موصلة للكهرباء، ومواد شبه موصلة للكهرباء ، ومواد عازلة *** . إذ أنه عند توصيل قطبي مصدر للجهد المستمر على طرفي مادة موصلة للكهرباء ، طبقاً لطاقة المصدر ومقدار توصيل المادة ، تتحرر كمية من إلكترونات المادة ذات الشحنة السالبة ، وتنجذب نحو قطب المصدر الموجب وتتحد معه ، وفي الوقت نفسه تنبعث هذه الكمية نفسها من الإلكترونات السالبة من القطب السالب للمصدر لتحل محل الإلكترونات الحرة للمادة التي اتحدت مع القطب الموجب للمصدر، وهكذا تنغلق الدائرة ، وتسمى هذه الكمية من الإلكترونات المتحركة باسم التيار المستمر . واتجاه التيار الموجب هو عكس اتجاه سير الإلكترونات السالبة كما هو موضح بالشكل ١-١ .



الشكل ١ - ١ اتجاه سير الإلكترونات واتجاه التيار الموجب

يسمى معدل تدفق الإلكترونات في المادة الموصلة للكهرباء «التيار الكهربائي»، ويقاس بالأمبير، ويرمز له بالرمز (A) ، وهو معدل تدفق شحنة مقدارها واحد كولوم في الثانية الواحدة .

وتعبر العلاقة التالية عن التيار I الناشئ من مرور شحنة مقدارها Q كولوم في زمن مقداره t بين مقطعين من موصل بسرعة منتظمة :

$$I = \frac{Q}{t} (A) \quad (1 - 1)$$

وكما نرى في الشكل ١ - ١ تم تحديد اتجاه التيار بعكس اتجاه سريان الإلكترونات . وينقسم التيار الكهربائي إلى تيار مستمر (ويرمز له بـ DC)، وتكون كمية سريان الشحنات فيه ثابتة مع الزمن ، وتيار متغير أو متردد (ويرمز له بـ AC) ويتغير فيه سريان الشحنات واتجاهها تغيراً دورياً مع الزمن .

* عند ذلك جسم ما فإن ذلك يسمح للجسم بتوليد الكهرباء ، ويسمى الجسم المسبب للخواص الكهربائية بالشحنة الكهربائية .

** قيمة شحنة الإلكترون على وجه التحديد $1.60217733 \times 10^{-19}$ كولوم.

*** تنقسم الموصلات إلى موصلات معدنية مثل الذهب والفضة والنحاس والألمنيوم وموصلات غير معدنية مثل الكربون والمحلول الإلكتروليتي والأرض وأجسام الحيوانات .

تشمل المواد العازلة على سبيل المثال: المطاط والشحوم الصناعية والأسبستوس والزجاج والرخام والميك والماء النقي والهواء والسيراميك .

والحصول على التيار المستمر تستخدم البطاريات الجافة كما تستخدم بطاريات الرصاص الحامضية للسيارات . أما التيار المتغير فهو الذي يتم توصيله للمنازل .

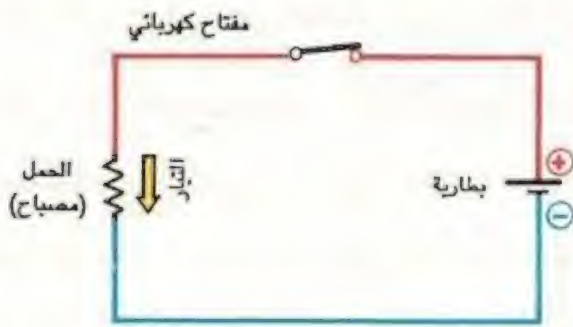
سؤال ١: شحنة كهربائية مقدارها 20 كولوم تمر خلال مقطع موصل لمدة خمس دقائق. كم تبلغ شدة التيار المار في الموصل ؟

سؤال ٢: شدة التيار المار في موصل ما تساوي 2 أمبير .
كم عدد الإلكترونات التي تمر خلال مقطع الموصل في الثانية الواحدة ؟

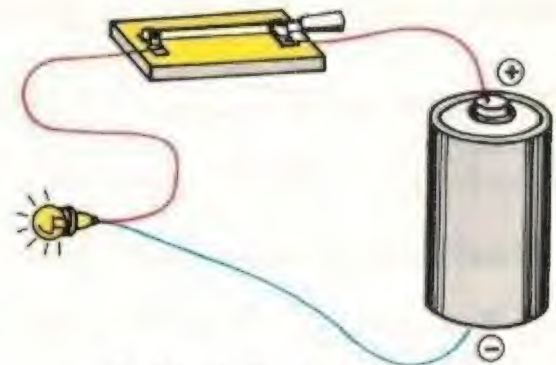
١ - ١ - ٢ الدوائر الكهربائية

إذا أحضرنا بطارية ومصباحاً صغيراً ومفتاحاً كهربائياً وقطعة من السلك ، ثم قمنا بتوصيلها ببعضها البعض كما في الشكل ١ - ٢ (أ) وقمنا بعد ذلك بوضع المفتاح في موضع التشغيل، فإن التيار سيمر في اتجاه السهم من القطب الموجب للبطارية (+) إلى القطب السالب (-) لكي يجعل المصباح الصغير يضيء ويسمى هذا المسار بالدائرة الكهربائية .

ويوضح الشكل ١ - ٢ (ب) كيفية رسم هذه الدائرة الكهربائية باستخدام رموز كهربائية . ويطلق على مصدر التيار الكهربائي - مثل البطارية - لفظ "مصدر قدرة" . أما الجزء الذي يستهلك الطاقة الكهربائية مثل المصباح الصغير فإنه يسمى الحمل .



ب - مخطط الدائرة الكهربائية

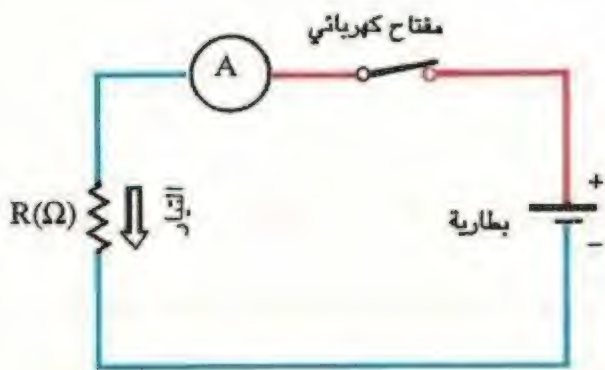


١ - كيفية التوصل على الطبيعة

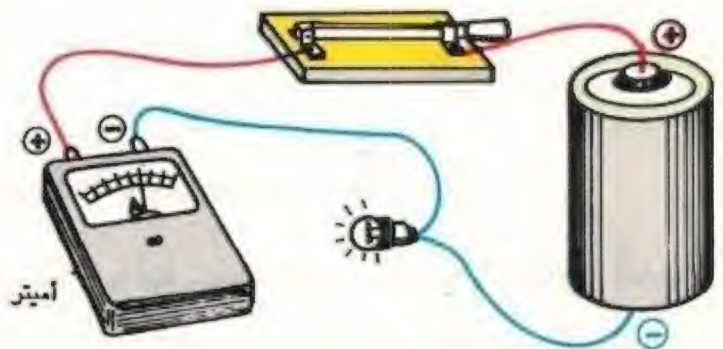
الشكل ١ - ٢ الدائرة الكهربائية

في الدائرة السابقة نفسها، إذا أضربنا أميتر (جهاز لقياس شدة التيار) وقمنا بتوصيله كما في الشكل ١ - ٢ لقياس قيمة التيار المار في هذه الدائرة ، ثم قمنا بتغيير المصباح بمصباح آخر يختلف عنه في القدرة؛ فإننا نلاحظ تغيراً في شدة التيار المار في الدائرة . ويرجع السبب في هذا التغير إلى تغير قيمة الحمل - أي توصيل حمل آخر للدائرة له مقاومة مختلفة لمرور التيار .

والمقاومة الكهربائية هي ببساطة مقاومة تمنع مرور التيار ووحدة قياسها هي الأوم الذي يرمز له بالرمز Ω .



ب - مخطط الدائرة الكهربائية

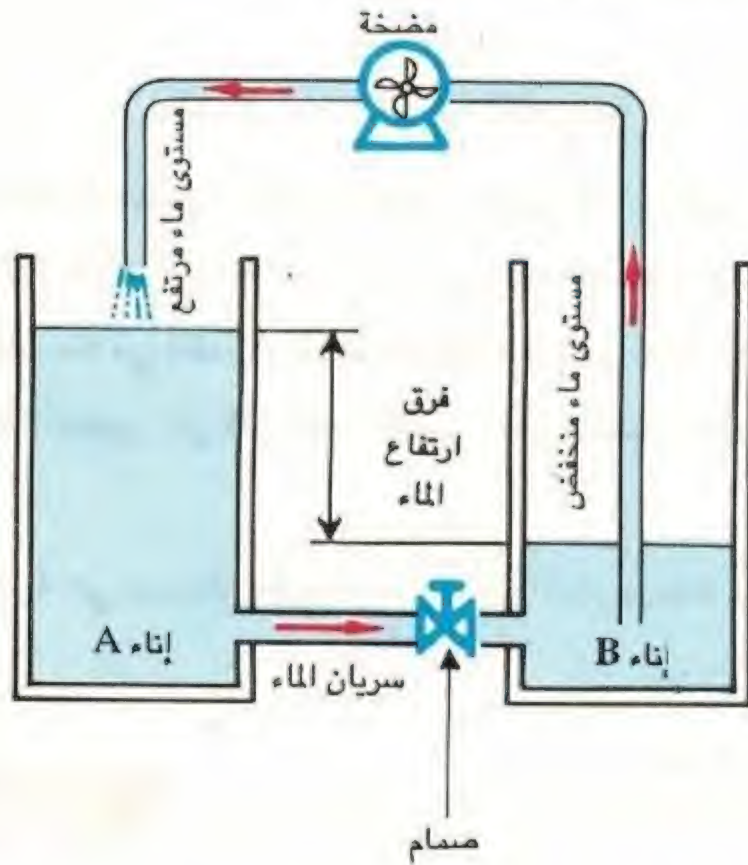


١ - كيفية توصيل العناصر المكونة للدائرة

الشكل ١ - ٣ توصيل جهاز قياس شدة التيار (الأميتر)

١-٣-١ الجهد الكهربائي والقوة الدافعة الكهربائية Electromotive Force

إذا كان لدينا إناءان (A, B) وقمنا بإيجاد فرق بين مستوى سطح الماء فيهما، وذلك بتوصيلهما عن طريق أنبوبة واستخدام مضخة كما هو موضح بالشكل ١ - ٤. (مستوى سطح الماء هو ارتفاع الماء في الإناء بالنسبة لسطح معلوم). فإنه عند فتح الصمام الموجود في الأنبوبة الموصلة بين الإناءين نجد أن الماء يسري من الإناء A (حيث سطح الماء مرتفع) إلى الإناء B (حيث سطح الماء منخفض).



الشكل ١ - ٤ سريان تيار الماء وعلاقته بفرق مستوى سطح الماء .

تناظر هذه التجربة مرور التيار في الدوائر الكهربائية . فمستوى سطح الماء يناظر الجهد الكهربائي، والتيار الكهربائي (مثل تيار الماء) يمر من الجهد المرتفع إلى الجهد المنخفض . والفرق بين جهدي النقطتين يسمى بفرق الجهد.

أما المضخة التي تسبب الفرق بين سطحي الماء في الشكل ١ - ٤ فإنها تناظر البطارية

الموجودة في الشكل ١ - ٣ ، ففي داخل البطارية* يتسبب التفاعل الكيميائي في إيجاد فرق جهد بين الطرفين . وتعرف القوة التي تسبب فرقاً في الجهد بالقوة الدافعة الكهربائية، ويعبر عنها بمقدار فرق الجهد الذي تولده .

يستخدم الفولت لقياس الجهد الكهربائي عند نقطة معينة وكذلك لقياس فرق الجهد بين نقطتين والقوة الدافعة الكهربائية . وهو وحدة قياس يرمز لها بالرمز (V) ** .

فإذا كان لدينا مقاومه مقدارها 1 أوم وقمنا بتوصيل طرفيها بفرق جهد مقداره 1 فولت فإن التيار المار في هذه الحالة تكون قيمته 1 أمبير .

وعلى هذا فإن فرق الجهد والتيار لهما وحدات فولت [V] وأمبير [A] على الترتيب كما سبق دراسته في البند السابق . وبالإضافة لهذه الوحدات فإن القيم الكبيره مثل (10^{+3}) فولت أو الصغيره مثل (10^{-3}) أمبير تجعلنا نضيف اختصارات مثل كيلو (10^{+3}) أو مللي (10^{-3}) لوحدات القياس الاساسية فتصبح مثلاً 1 كيلو فولت [kV] أو 1 مللي أمبير [mA] . ويوضح الجدول ١ - ١ وحدات قياس كل من الجهد والتيار .

العلاقة بين الوحدات	رمز الوحدة	وحدة القياس	الكمية
$1 \text{ kV} = 1000\text{V} = 10^3\text{V}$	kV V	كيلو فولت فولت	الجهد
$1\text{mV} = \frac{1}{1000} \text{ V} = 10^{-3}\text{V}$	mV	مللي فولت	
$1\mu\text{V} = \frac{1}{1000 \ 000} \text{ V} = 10^{-6}\text{V}$	μV	ميكرو فولت	
$1\text{mA} = \frac{1}{1000} \text{ A} = 10^{-3}\text{A}$	mA	امبير مللي امبير	التيار
$1\mu\text{A} = \frac{1}{1000 \ 000} \text{ A} = 10^{-6}\text{A}$	μA	ميكرو امبير	

الجدول ١ - ١ وحدات قياس الجهد والتيار

سؤال ٣

حوّل الكميات الآتية إلى الوحدات الموجودة بين الأقواس :

(١) 300 مللي أمبير (A)

(٢) 5 كيلو فولت (V)

(٣) 100 ميكرو أمبير (mA)

(٤) 0.8 فولت (mV)

* سيتم دراسة البطاريات بالتفصيل فيما بعد

** 1 فولت : يكافئ شغل مقداره 1 جول تبذله شحنة مقدارها 1 كولوم (سيتم دراسته بالتفصيل فيما بعد)

١ - ٢ حسابات دوائر التيار المستمر

١ - ٢ - ١ قانون أوم Ohm's law

عندما يوجد فرق جهد بين طرفي مقاومة فإن ذلك يسبب مرور تيار - وقد أوجد جورج سيمون أوم العلاقة بين فرق الجهد وشدة التيار وقيمة المقاومة .

جورج سيمون أوم (١٧٨٧ - ١٨٥٤م)

عالم فيزياء ألماني كان والده صانع مفاتيح ، وقد تعلم الرياضيات من والده في سن مبكر . وكان يعيش حياة فقيرة أثناء عصر الثورة الصناعية التي غيرت مجتمعه تماماً . وقد أثبت القانون المعروف باسمه (قانون أوم) في عام ١٨٢٦ ، ونشر كتاباً يشرح فيه

الموضوع بالتفصيل . ولكن المجتمع الأكاديمي الألماني رفض قبول اكتشاف النظرية في هذا الوقت . وفيما بعد أعيد نشر كتابه في أماكن كثيرة خارج ألمانيا منها إنجلترا على سبيل المثال ، ونال العديد من الجوائز بسبب هذا الإنجاز القيم . وفي النهاية حصل على التقدير المناسب في مسقط رأسه وعُيِّن عميداً للكلية الفنية بنورنبرج، ثم عمل أستاذاً في جامعة ميونيخ في سن الستين .

وقد سميت وحدة قياس المقاومة بالأوم (Ω) نسبة إلى هذا العالم الكبير .

إذا كانت المقاومة الموجودة في الشكل ١ - ٥ ثابتة وقيمتها $R (\Omega)$ ثم قمنا بتغيير فرق الجهد $V(V)$ بواسطة ريوستات منزلة فإننا نجد أن التيار الكهربائي $I (A)$ يتناسب طردياً مع قيمة فرق الجهد .

هذه العلاقة تعرف بقانون أوم، وتعبّر عنها المعادلة الآتية :

$$I = \frac{V}{R} (A) \quad (1-2)$$

ويمكن أيضاً كتابة هذه المعادلة على الصورة :

$$R = V / I (\Omega) \quad \& \quad V = RI (V) \quad (1-3)$$

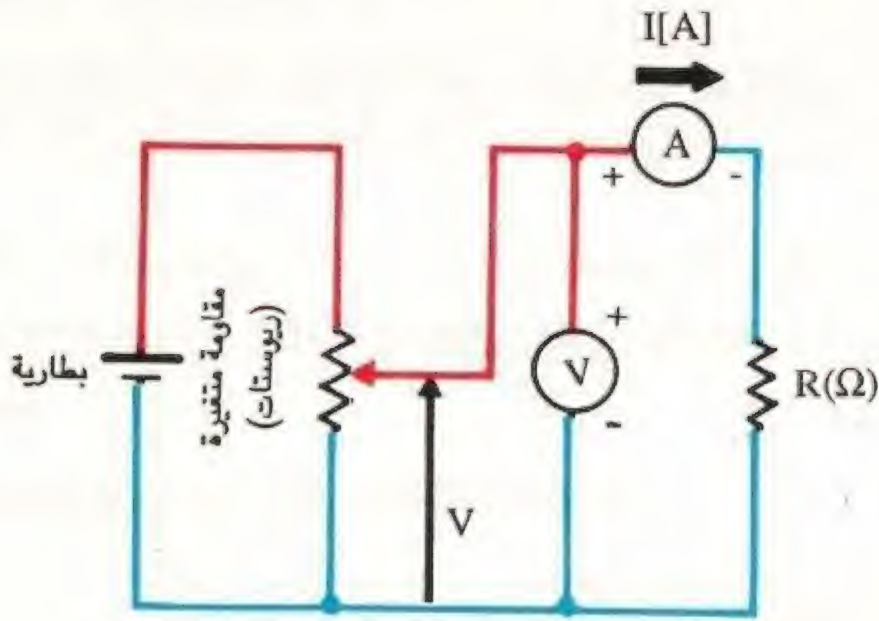
ويمكن أيضاً كتابتها على الصورة:

$$G = 1/R \text{ حيث } I = GV$$

وتسمى G التوصيلية الكهربائية، ووحدة قياسها السيمنز ويرمز لها بالرمز (S) . وهي كمية تعبر عن مدى سهولة سريان التيار .

سؤال ٤

عند توصيل مصباح صغير مع بطارية فرق الجهد بين طرفيها 1.5 فولت يمر تيار قيمة 300 مللي أمبير. أحسب قيمة المقاومة عند إضاءة المصباح؟



الشكل ١ - ٥

سؤال ٥

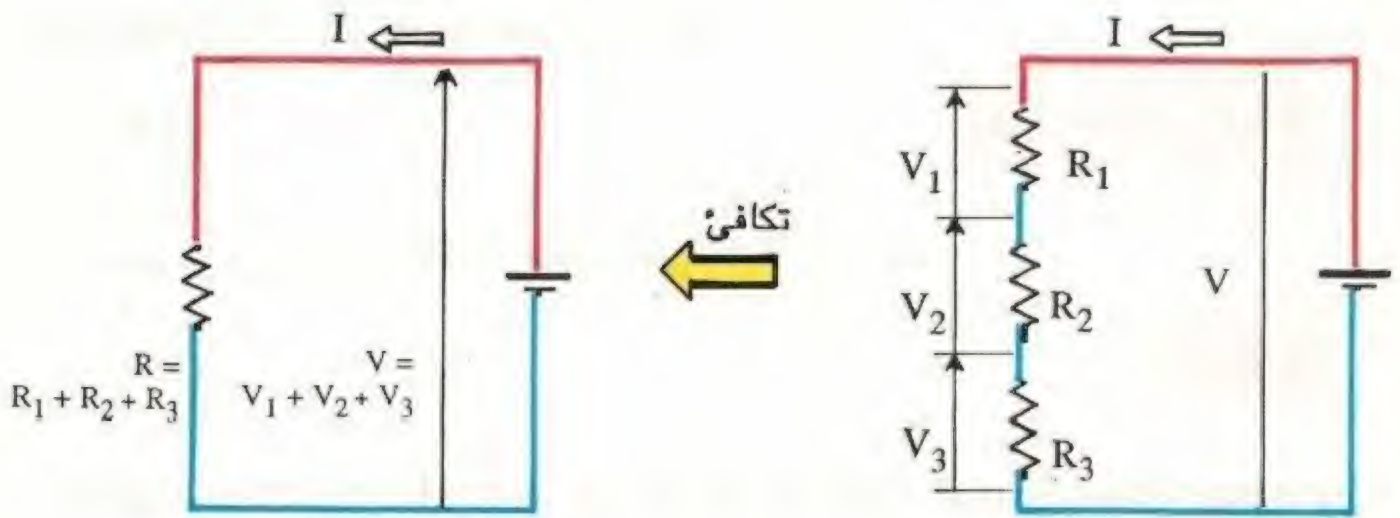
مقاومة قيمتها 5 أوم متصلة مع بطارية فرق الجهد بين طرفيها 3 فولت. احسب قيمة التيار المار بالمللي أمبير .

سؤال ٦

مقاومة قيمتها 15 أوم يمر فيها تيار شدته 8 أمبير. احسب فرق الجهد بين طرفي المقاومة.

١- توصيل المقاومات على التوالي Series connection of resistors

التوصيل على التوالي - كما هو مبين في الشكل ١ - ٦ (أ) هو أسلوب توصيل تكون فيه المقاومات كلها في صف واحد . وعند التوصيل على التوالي يمر التيار نفسه في جميع المقاومات دون تغيير .



ب - الدائرة المكافئة

أ - التوصيل على التوالي

الشكل ١ - ٦ توصيل المقاومات على التوالي

من هنا نجد أن فرق الجهد V (V) الموجود بين نهايتي المقاومات الثلاثة R_3 , R_2 , R_1 ينتج عنه مرور تيار قيمته I (A) . أما فروق الجهد بين طرفي كل مقاومة على حدة فيمكن حسابها من قانون أوم كما يلي :

$$V_1 = IR_1 (V) \text{ \& } V_2 = IR_2 (V) \text{ \& } V_3 = IR_3 (V)$$

(1-4)

ويكون مجموع فروق الجهد الثلاثة V_1, V_2, V_3 مساوياً لفرق جهد مصدر القدرة V ،
ومن هنا نحصل على هذه المعادلة :

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = R_1 I + R_2 I + R_3 I = (R_1 + R_2 + R_3) I \quad (1-5)$$

من هنا يتضح أن المقاومات الثلاث في الشكل ١ - ٦ (أ) يمكن أن تحل محلها مقاومة
واحدة قيمتها $R (\Omega)$ كما هو مبين في الشكل ١ - ٦ (ب) .

$$R = R_1 + R_2 + R_3 (\Omega) \quad (1-6)$$

بتطبيق قانون أوم على الدائرة الموجودة في الشكل ١ - ٦ نجد أن :

$$V = IR (V) \quad (1-7)$$

وبمقارنة المعادلتين (1-5) & (1-7) نجد أن قيمة فرق الجهد V نفسها موجودة بين
طرفي الدائرتين في الشكل ١ - ٦ (أ ، ب) لذلك فهي قيمة التيار I نفسه في كلتا الدائرتين
أي أن الدائرة المرسومة في الشكل ١ - ٦ (ب) تكافئ الدائرة المرسومة في الشكل ١ - ٦ (أ)
والمقاومة $R (\Omega)$ المحسوبة في المعادلة (1-6) تكافئ المقاومات الثلاث R_3, R_2, R_1 في
حالة التوصيل على التوالي .

لذلك يمكن حساب شدة التيار I (أمبير) المار في الدائرة من المعادلة التالية (والمستنتجة من
المعادلة (1 - 5)

$$I = \frac{V}{R_1 + R_2 + R_3} (A) \quad (1-8)$$

سؤال ٧

بفرض أن قيم المقاومات في الشكل ١ - ٦ (أ) كانت كالآتي :

$$R_1 = 10 \, \Omega \quad R_2 = 30 \, \Omega \quad R_3 = 40 \, \Omega$$

وأن فرق الجهد هو $V = 100 \, (V)$

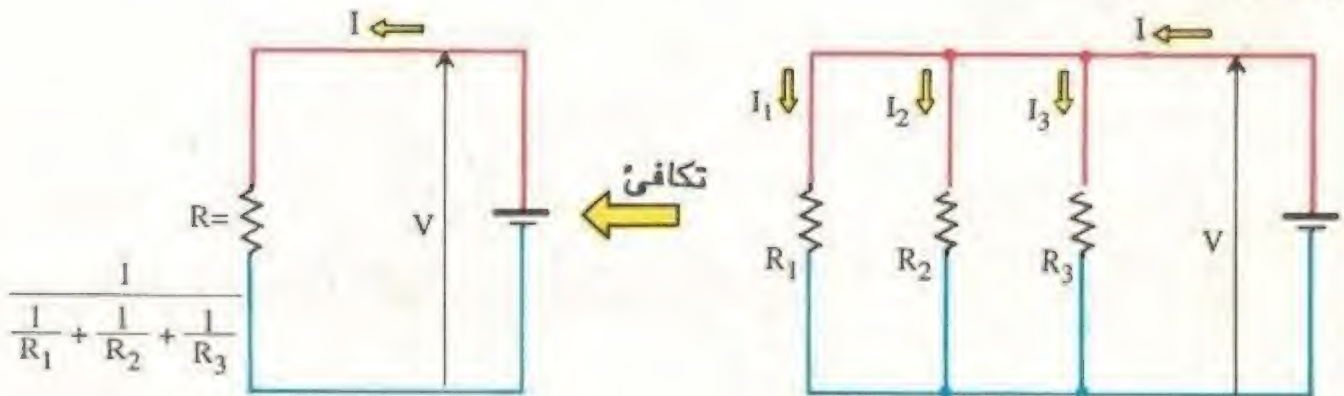
احسب المقاومة المكافئة وشدة التيار المار في الدائرة ؛ وكذلك فروق الجهد V_1, V_2, V_3 بين طرفي كل مقاومة .

سؤال ٨

إذا كان فرق الجهد بين طرفي مقاومة هو 3 فولت، وشدة التيار المار بها 200 مللي أمبير. احسب قيمة المقاومة .

ب - توصيل المقاومات على التوازي Parallel connection of resistors

عند توصيل المقاومات على التوازي يتم توصيل طرفي كل مقاومه ببعضها كما هو مبين بالشكل ١ - ٧ .



ب - الدائرة المكافئة

أ - التوصيل على التوازي

١ لشكل ٧ - ١ توصيل المقاومات على التوازي

عند وضع طرفي المقاومات المتصلة على التوازي بين نقطتين فرق الجهد بينهما V فولت، ينشأ تيار مقداره I_1 أمبير في المقاومة الأولى ، I_2 أمبير في الثانية ، I_3 أمبير في الثالثة. في حين يكون فرق الجهد بين طرفي كل مقاومة متساوي V فولت للمقاومات الثلاثة . لهذا يمكن إيجاد قيم التيارات I_1 , I_2 , I_3 من قانون أوم بالمعادلة التالية :

$$I_1 = \frac{V}{R_1} (A) \quad I_2 = \frac{V}{R_2} (A) \quad I_3 = \frac{V}{R_3} (A) \quad (1-9)$$

ونلاحظ أن التيار I قد انقسم إلى ثلاثة أجزاء I_1 , I_2 , I_3 ويوضح الشكل ١ - ٧ (ب) الدائرة المكافئة للدائرة المرسومة في الشكل ١ - ٧ (أ) ويمكن أن نستنتج منه العلاقة التالية :

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) V = \frac{V}{R} (A) \quad (1-10)$$

ومنها نحصل على المقاومة المركبة $R [\Omega]$ المكونة من $R_1 [\Omega]$, $R_2 [\Omega]$, $R_3 [\Omega]$ والموصلة على التوازي وفق المعادلة التالية :-

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \quad (1 - 11)$$

سؤال ٩

في الشكل ١ - ٧ (أ) إذا كانت قيم المقاومات كالآتي :

$$R_1 = 40 \Omega$$

$$R_2 = 20 \Omega$$

$$R_3 = 10 \Omega$$

وكان فرق الجهد بين قطبي البطارية $V=100(V)$. احسب التيار المار في كل مقاومة I_1, I_2, I_3 والمقاومة المكافئة R بالأوم .

سؤال ١٠

في الشكل ٧ - ١ (أ) إذا كانت شدة التيار تساوي 15 أمبير وقيم المقاومات كالآتي :

$$R_1 = 2 \Omega \quad R_2 = 3 \Omega \quad R_3 = 6 \Omega$$

احسب فرق الجهد بين طرفي البطارية والتيار الكلي المار في المقاومات .

سؤال ١١

اثبت أنه عند توصيل مقاومتين R_1, R_2 على التوازي تكون قيمة المقاومة المكافئة R هي :

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

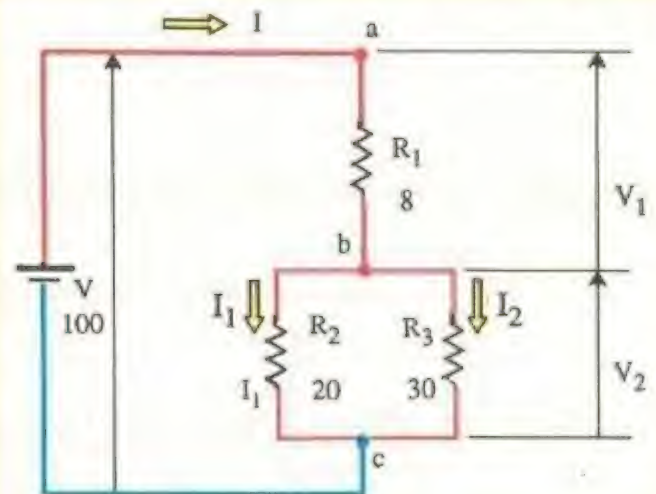
ح - التوصيل على التوازي والتوالي معاً

في الدوائر الكهربائية يتم المزج بين التوصيل على التوالي والتوصيل على التوازي بطرق مختلفة .

وعند حل مثل هذه الدوائر يكون من المناسب أن نوجد المقاومة المكافئة للمقاومات المتصلة على التوازي أولاً .

مثال ١

احسب قيم كل من V_2, V_1, I_2, I_1, I في الدائرة المبينة بالشكل ١ - ٨



الشكل ١ - ٨ المزج بين التوالي والتوازي

الحل

لحساب المقاومة المكافئة بين النقطتين c & b نستخدم العلاقة الآتية :

$$R_{bc} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{20 \times 30}{20 + 30} = 12 \, \Omega$$

وبالتالي تكون المقاومة المكافئة بين c & a كما يلي :

$$R_{ac} = R_1 + R_{bc} = 8 + 12 = 20 \, \Omega$$

وتكون قيمة التيار I (بالأمبير) المار في الدائرة هي :

$$I = \frac{V}{R_{ac}} = \frac{100}{20} = 5(A)$$

ومنها نحسب قيم فروق الجهد V_2, V_1 باستخدام العلاقة الآتية [المستنتجة من المعادلة (1-4)]

$$V_1 = R_1 I = 8 \times 5 = 40(V) \text{ \& } V_2 = R_{bc} I = 12 \times 5 = 60(V)$$

ثم نحسب قيم التيارين I_2, I_1 من قانون أوم :

$$I_1 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{60}{20} = 3(A), \quad I_2 = \frac{V_2}{R_3} = \frac{60}{30} = 2(A)$$

سؤال ١٢

في الشكل ٨ - ١ إذا كان التيار I يساوي 10 أمبير ، احسب كلاً من I_1, I_2, V_1, V_2 وكذلك فرق الجهد بين قطبي البطارية V .

د - توصيل البطارية والدائرة المكافئة لها

يوضح الشكل ٨ - ٩ المقاومة الداخلية للبطارية ، ولحساب هذه المقاومة ، نفرض أن قيمتها تساوي r أوم ، وأن التيار الكلي المار في الدائرة يساوي I أمبير فيصبح فرق الجهد بين قطبي البطارية مقداره V فولت ، وهو أقل من القوة الدافعة الكهربائية للبطارية (وقيمتها E فولت) بقيمة مقدارها (rI)

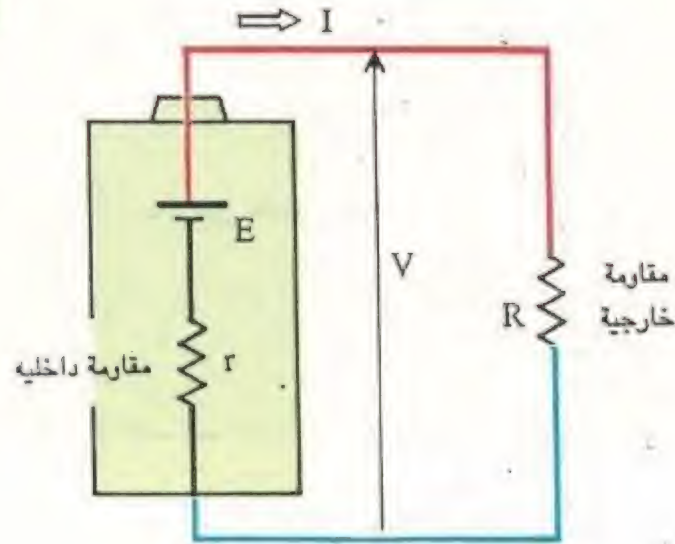
لذلك يمكن التعبير عن العلاقة بين القوة الدافعة الكهربائية (E) وفرق الجهد بين قطبي البطارية (V) بالمعادلة :

$$V = E - rI (V) \quad (1 - 12)$$

ومن ثم يحسب التيار المار في الدائرة بالعلاقة التالية على اعتبار أن $V = IR$ ،

$$I = \frac{E}{r+R} (A)$$

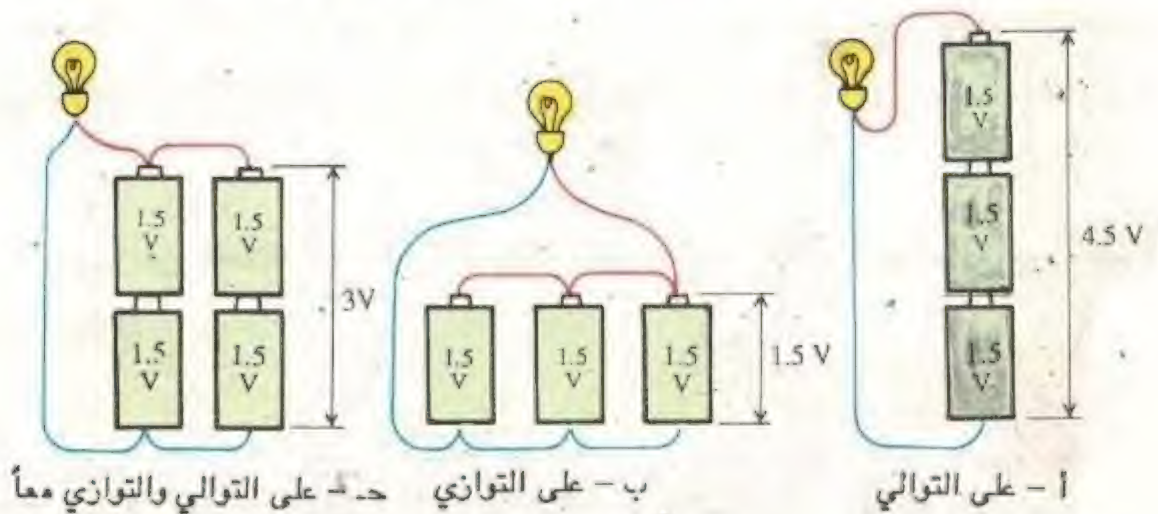
(1 - 13)



الشكل ١ - ٩ دائرة البطارية

عند توصيل البطاريات تستخدم طرق التوصيل على التوالي، أو على التوازي، أو مزيج من الطريقتين، كما في الشكل ١ - ١٠

ولكن يجب ملاحظة أن توصيل بطاريات مختلفة على التوازي يؤدي إلى سريان مستمر للتيار بين البطاريات طبقاً لفرق الجهد بينها مما يؤدي إلى سرعة استهلاك البطارية.



الشكل ١ - ١٠ توصيل البطاريات

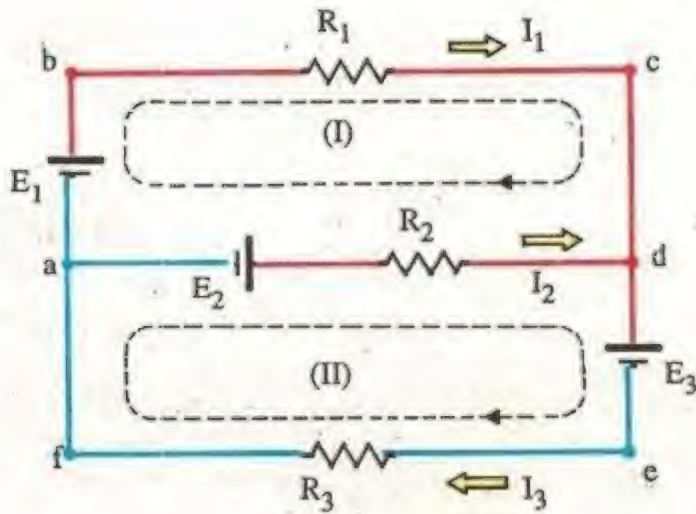
سؤال ١٣

مقاومة خارجية مقدارها 4.9 أوم تتصل ببطارية ذات قوة دافعة كهربائية مقدارها 1.5 فولت، ومقاومة داخلية مقدارها 0.1 أوم . احسب قيمة التيار المار في الدائرة وفرق الجهد بين قطبي البطارية .

في الدائرة نفسها إذا زاد عدد البطاريات إلى ثلاثة بطاريات (من النوع نفسه) متصلة على التوالي. احسب التيار المار في الدائرة، وفرق الجهد بين طرفي المقاومة الخارجية في هذه الحالة .

١ - ٢ - ٢ الدوائر الكهربائية المركبة Complex electric circuits

فيما سبق تكلمنا عن دائرة كهربائية بسيطة تتكون من مصدر كهربائي يتصل مباشرة بالحمل؛ أما في الدوائر المركبة مثل الشبكة في توصيلها فهي أساساً تتكون من مجموعة من الدوائر البسيطة بينها علاقات مختلفة ، وينتج عن ذلك صعوبة في حل الدائرة (إيجاد الجهد عند كل نقطة والتيار في كل فرع) إذا استخدمنا قانون أوم فقط . ولذا في مثل هذه الحالة يستخدم قانون كيرشوف في الحل .



الشكل ١ - ١١ مثال لدائرة كهربائية مركبة

أ - القانون الأول لكيرشوف Kirchhoff's First law

وهو يتعلق أساساً بالتيار الكهربائي ومنطوقه كالآتي :

" مجموع التيارات الداخلة في نقطة ما في الدائرة الكهربائية يساوي مجموع التيارات الخارجة من النقطة نفسها " .

على سبيل المثال : في النقطة d في الشكل ١ - ١١ نجد أن التيارين I_1, I_2 داخلاً في النقطة d والتيار I_3 خارج منها. لهذا تبين المعادلة التالية العلاقة بين التيارات الكهربائية الموجودة عند النقطة " d " .

$$I_1 + I_2 = I_3$$

(1 - 14)

وباعتبار أن التيار الداخل في النقطة d له إشارة موجبة والخارج له إشارة سالبة (على سبيل المثال) .

نستنتج أن :

" مجموع التيارات الداخلة في نقطة ما يساوي صفراً "

$$I_1 + I_2 + (- I_3) = \text{Zero}$$

(1 - 15)

ب - القانون الثاني لكيرشوف

وهو يتعلق أساساً بفرق الجهد ومنطوقه كالآتي :

" بالنسبة لأي مسار مغلق في دائرة كهربائية : إذا بدأنا من نقطة معينة وتحركنا في اتجاه ثابت يكون مجموع القوى الدافعة الكهربائية في كل جزء من المسار مساوياً لمجموع فروق الجهود على الأحمال الموجودة في الدائرة " .

على سبيل المثال : في الشكل ٨ - ١١ إذا كان I , II هما مساران مغلقان بحيث تكون اتجاهات التيارات المارة فيهما كما هو مبين بالرسم، يكون اتجاه القوى الدافعة الكهربائية أو فروق الجهد التي تتفق مع اتجاه السهم موجباً والتي تختلف معه سالباً . طبقاً لذلك يمكن كتابة المعادلة التالية بالنسبة للمسار المغلق I :

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 = E_1 - E_2 \quad (1-16)$$

ومن هذه المعادلة نجد أن فرق الجهد $I_2 R_2$ والقوة الكهربائية E_2 لهما إشارة سالبة لأن اتجاه I_2 ، و اتجاه E_2 (من القطب السالب إلى الموجب) مخالفان لاتجاه السهم . أما بالنسبة للمسار المغلق II يمكن كتابة المعادلة :

$$R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2 - E_3 \quad (1-17)$$

حيث E_3 سالبة لأن اتجاهها (من القطب السالب إلى الموجب) في عكس اتجاه السهم . نستنتج مما سبق أنه عند تطبيق قوانين كيرشوف على دائرة ما فإن تتبع اتجاهات التيار والاتجاه الذي يتخذه في المسار المغلق (اتجاه الأسهم في الشكل السابق) يكونان على درجة عالية من الأهمية للحصول على معادلات صحيحة .

ولحساب التيارات المختلفة في الشكل ٨ - ١١ (I_3, I_2, I_1) يجب أن نقوم بحل ثلاث معادلات في آن واحد هي $(1-14)$ و $(1-15)$ و $(1-16)$ أو $(1-17)$. فإذا حصلنا في الناتج على تيار له إشارة سالبة فإن ذلك يعنى أن الاتجاه الفعلي للتيار في عكس الاتجاه المفروض أصلاً قبل إيجاد الحل .

مثال ٢

في الشكل ١ - ١١

نفرض أن قيم المقاومات هي : $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 2 \Omega$, $R_3 = 5 \Omega$

والقوى الدافعة الكهربائية هي : $E_1 = 6 (V)$ & $E_2 = 4 (V)$ & $E_3 = 2 (V)$

أحسب اتجاهات التيارات المارة في كل مقاومة من المقاومات السابقة مع أخذ اتجاه المسار المغلق كما في الشكل .

الحل

نفرض أن اتجاهات التيارات المارة في المقاومات هي كما هو مبين بالشكل ١ - ١١ .
بتطبيق القانون الأول لكيرشوف عند النقطة (d) نجد أن :

$$I_1 + I_2 = I_3 \rightarrow (1)$$

ثم بتطبيق القانون الثاني لكيرشوف للمسارين المغلقين I , II .
بالنسبة للمسار I (الدائرة المغلقة) :

$$10 I_1 - 2 I_2 = 6 - 4 = 2 \rightarrow (2)$$

وبالنسبة للمسار الثاني II :

$$2 I_2 + 5 I_3 = 4 - 2 = 2 \rightarrow (3)$$

ثم نقوم بحل المعادلات الثلاث الآتية (1) ، (2) ، (3) .

بالتعويض من (1) في (3) ينتج أن :

$$2 I_2 + 5 (I_1 + I_2) = 2$$

أي إن :

$$5 I_1 + 7 I_2 = 2 \quad (4)$$

من (2) ، (4) يمكن حساب قيم التيارين I_1 ، I_2 فينتج أن

$$I_1 = 0.225 \text{ (A)} \quad I_2 = 0.125 \text{ (A)} \quad (5)$$

ولحساب I_3 نقوم بالتعويض من المعادلة (5) فى المعادلة (1) فينتج أن:

$$I_3 = 0.35 \text{ (A)}$$

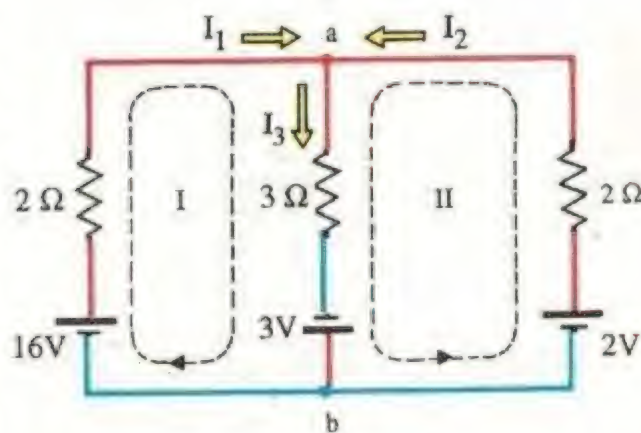
ونلاحظ أن قيم I_1 ، I_2 ، I_3 كلها موجبة ، وهذا يعني أن الاتجاهات الفعلية للتيارات الثلاثة مطابقة للاتجاهات التى فرضناها على الرسم قبل الحل .

سؤال ١٤

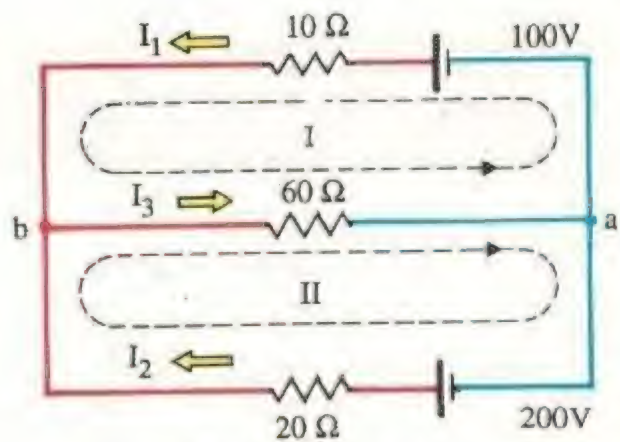
فى الشكل ١ - ١٢ احسب قيم I_1 ، I_2 ، I_3 وأوجد اتجاهات التيار . ابدأ الحل مفترضاً أن اتجاهات التيار كما هو موضح بالرسم .

سؤال ١٥

فى الشكل ١ - ١٣ احسب قيم I_1 ، I_2 ، I_3 بفرض أن اتجاهات التيار مطابقة لاتجاهات الأسهم .



الشكل ١ - ١٣



الشكل ١ - ١٢

ح- دائرة القنطرة Bridge circuit

فى دائرة القنطرة توجد أربعة مقاومات R_1 , R_2 , R_3 , R_4 ، ونقطتى توصيل هما النقطة (b) بين المقاومتين R_1 , R_2 والنقطة (c) بين المقاومتين R_3 , R_4 . كما هو موضح بالشكل ١ - ١٤ .

فى هذا الشكل إذا كان الجهد عند النقطة (b) مساوياً للجهد عند النقطة (c) فإننا نحصل على المعادلة :

$$R_1 I_1 = R_3 I_2 , \quad R_2 I_1 = R_4 I_2 \quad (1 - 18)$$

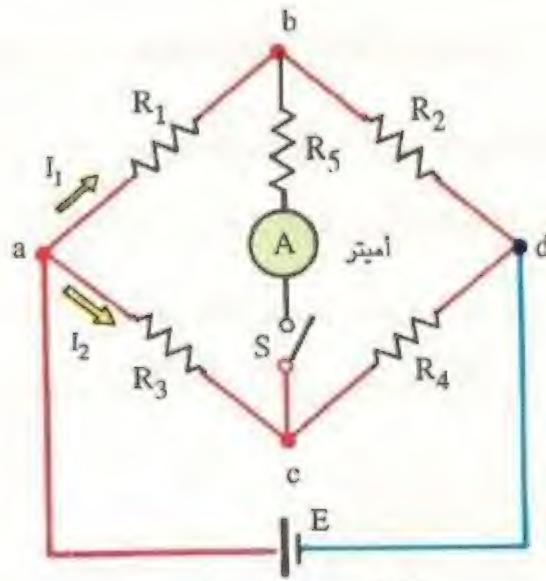
وتسمى القنطرة فى هذه الحالة قنطرة متزنة ، وفى هذه الحالة لا يمر تيار فى الأميتر عند إغلاق المفتاح S .

من المعادلة (1 - 18) نحصل على العلاقة :

$$\frac{R_1 I_1}{R_2 I_1} = \frac{R_3 I_2}{R_4 I_2}$$

ومن هذا ينتج أن :

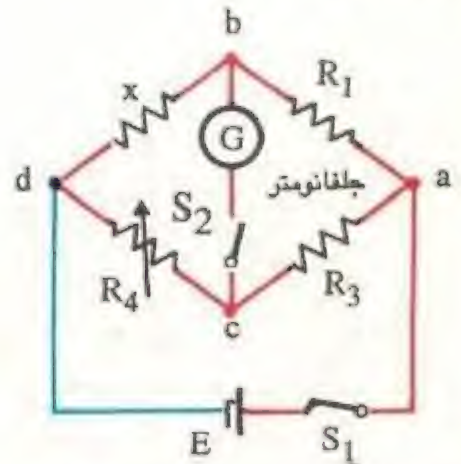
$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad \text{أو} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (1 - 19)$$



R5 : مقاومة لحماية الاميتر

الشكل ١ - ١٤ دائرة القنطرة

وتستخدم فكرة دائرة القنطرة في قياس المقاومات بدقة، ويطلق عليها في هذه الحالة قنطرة هويتستون . ويوضح الشكل ١ - ١٥ شكل هذه القنطرة والدائرة المكافئة لها وكذلك شكل الجلفانومتر * .



(أ) فكرة قنطرة هويتستون (الدائرة الكهربائية) (ب) صورة قنطرة هويتستون (ج) جلفانومتر

الشكل ١ - ١٥ قنطرة هويتستون والجلفانومتر

د - طريقة عمل قنطرة هويتستون Wheatstone bridge

لقياس مقاومة مجهولة X بواسطة قنطرة هويتستون يتم ضبط المقاومة R_4 حتى لا يمر تيار في الجلفانومتر حتى مع إغلاق المفتاح S ، يدل ذلك على اتزان القنطرة .
ثم نعوض في المعادلة (19 - 1) بقيم المقاومات المعروفة R_1 , R_3 , R_4 للحصول على قيمة X التي تناظر R_2 في المعادلة (19 - 1) ونحسب X من المعادلة : **

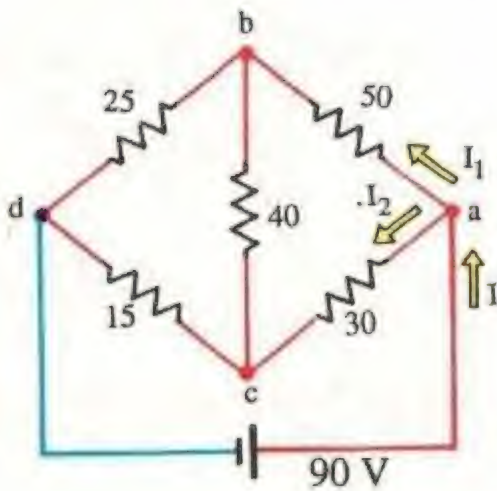
$$X = \frac{R_1}{R_3} R_4 \quad \{ \Omega \} \quad (1 - 20)$$

سؤال ١٦

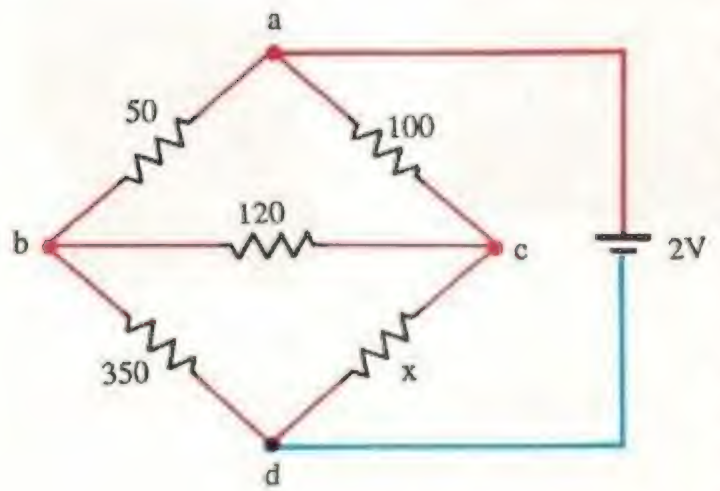
في الشكل ١ - ١٦ احسب قيمة المقاومة المجهولة X بفرض اتزان القنطرة .

سؤال ١٧

في الشكل ١ - ١٧ احسب قيمة التيارات I_1 , I_2 , I



الشكل ١ - ١٧



الشكل ١ - ١٦

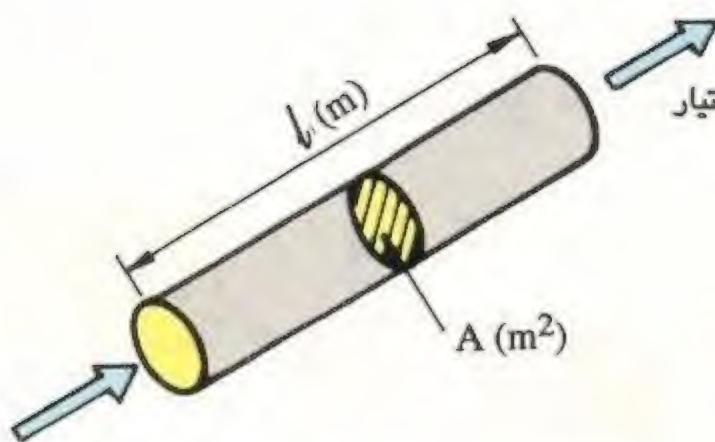
* الجلفانومتر Galvanometer هو جهاز قياس يستخدم لقياس شدة التيار وقيم الجهد المتناهية في الصغر

** في قنطرة هويتستون يتم القياس عندما لا يتحرك مؤشر الجلفانومتر، وهذه تسمى طريقة "صفيرية"، وهي أدق طرق القياس التي تعتمد على انحراف المؤشر وحركته، لأنه في مثل هذه الطرق يحتاج المؤشر لطاقة تحركه ويستمدّها من الدائرة المقاسة مما يؤثر على القيمة المقاسة (شدة تيار أو فرق جهد).

١ - ٣ المقاومة الكهربائية Electric resistance

١ - ٣ - ١ مقاومة الموصل conductor

تختلف مقاومة الموصل تبعاً لنوع المادة المصنوع منها . وبالنسبة للمقاومات المصنوعة من المادة نفسها ، فإن زيادة مساحة المقطع تقلل المقاومة وزيادة طول الموصل يزيد المقاومة .



الشكل ١ - ٨ مقاومة الموصل .

وحدة القياس	رمز الوحدة	العلاقة بين الوحدات
ميغا أوم	$M\Omega$	$1 M\Omega = 10^6 \Omega$
كيلو أوم	$k\Omega$	$1 k\Omega = 10^3 \Omega$
أوم	Ω	
ملي أوم	$m\Omega$	$1 m\Omega = 10^{-3} \Omega$
ميكرو أوم	$\mu\Omega$	$1 \mu\Omega = 10^{-6} \Omega$

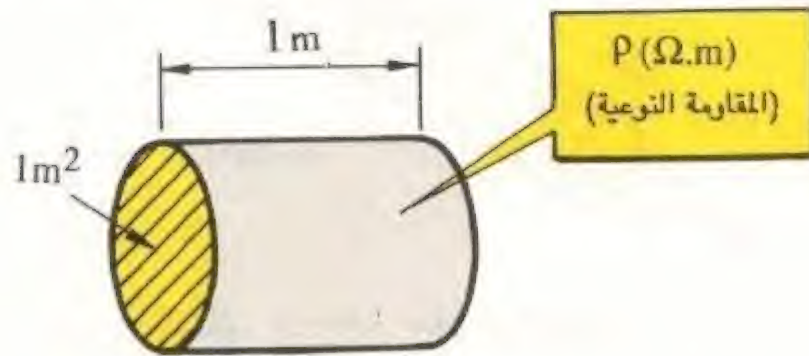
الجدول ١ - ٢ وحدات قياس المقاومة

أي إن مقاومة أي موصل بوجه عام تتناسب طردياً مع طوله وتتناسب عكسياً مع مساحة مقطعه .

ولحساب قيمة مقاومة مصنوعة من موصل طوله l (متر) ومساحة مقطعه A (متر مربع) نستخدم العلاقة .

$$R = \rho \frac{l}{A} \{ \Omega \} \quad (1 - 21)$$

حيث ρ هي المقاومة النوعية لمادة الموصل، وهي قيمة ثابتة للموصل الواحد وتساوي مقاومة موصل من هذه المادة طوله متر ومساحة مقطعه متر مربع؛ كما هو مبين في الشكل ١ - ١٩



الشكل ١ - ١٩ المقاومة النوعية Resistivity

وحدة قياس المقاومة النوعية هي الأوم . متر ويرمز لها بالرمز $(\Omega \cdot m)$ وتحسب من المعادلة :

$$\rho = \frac{RA}{\cancel{L}} \frac{(\Omega)(m^2)}{(\cancel{m})} = \frac{RA}{\cancel{L}} (\Omega \cdot m) \quad (1 - 22)$$

ويبين الجدول ١ - ٣ قيم المقاومة النوعية لبعض المعادن بينما يبين الجدول ١ - ٤ وحدات قياس المقاومة النوعية .

المقاومة النوعية $\rho[\Omega.m] \times 10^{-8}$	المعدن
2.75	الالومنيوم
1.62	الفضه
1.72	النحاس
10.6	البلاتين

الجدول ١ - ٣ المقاومة النوعية للمعادن ($20^\circ C$)

وحدة القياس	العلاقة بين الوحدات
$\Omega.m$	
$\Omega.cm$	$1 \Omega.cm = 10^{-2} \Omega.m$
$\Omega.mm^2/m$	$1 \Omega.mm^2/m = 10^{-6} \Omega.m$

الجدول ١ - ٤ وحدات قياس المقاومة النوعية

مثال ٣

احسب مقاومة سلك من النحاس طوله 50 متراً وقطره 2 ملليمتر عند درجة حرارة 20 درجة مئوية.

الحل

لحساب مساحة مقطع الموصل بمعلومية طول القطر تستخدم العلاقة :

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (2 \times 10^{-3})^2}{4} = \pi \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

من العلاقة (21 - 1) يمكن حساب قيمة المقاومة R :

$$R = 1.72 \times 10^{-8} \times \frac{50}{\pi \times 10^{-6}} = 0.274 \Omega$$

سؤال ١٨

احسب مقاومة سلك من الألومنيوم نصف قطره 0.5 مم، وطوله 12 متراً عند درجة حرارة 20 درجة مئوية.

سؤال ١٩

سلك معدني طوله 10 أمتار، ومساحة مقطعه 1 مم²، ومقاومته 0.4 أوم . احسب المقاومة النوعية لهذا المعدن .

١ - ٣ - ٢ التوصيلية النوعية Conductivity

بالإضافة إلى المقاومة النوعية تستخدم التوصيلية النوعية للتعبير عن مدى سهولة سريان التيار الكهربائي في مادة ما . ووحدة قياس التوصيلية النوعية هي السيمنز لكل متر (S/m) والتوصيلية النوعية (ويرمز لها بالرمز σ) هي مقلوب المقاومة النوعية كما يتضح من العلاقة التالية :

$$\sigma = 1 / \rho \quad (1 - 23)$$

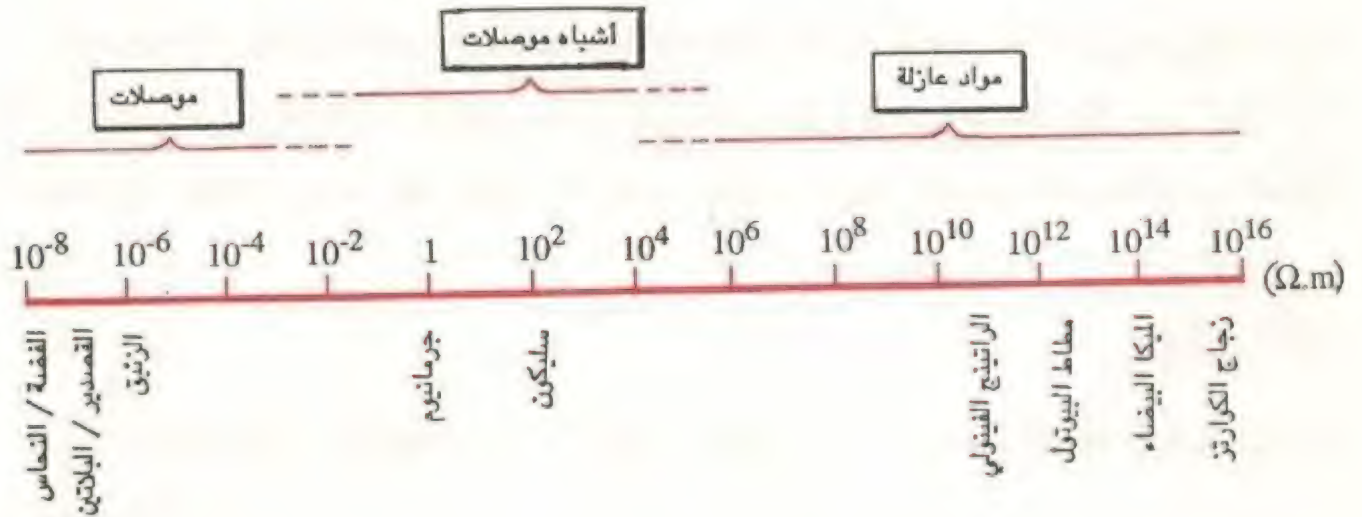
حيث أنه بالتعويض من العلاقة (1 - 22) في العلاقة (1 - 23) تنتج العلاقة التالية الخاصة بالتوصيلية النوعية

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\frac{RA}{l}} = \frac{l}{RA} \quad (S / m) \quad (1 - 24)$$

أما التوصيلية النوعية النسبية فتستخدم للتعبير عن النسبة المئوية للتوصيلية النوعية للمعدن بالنسبة للتوصيلية النوعية للنحاس المعالج المعياري الدولي . وتبلغ قيمة التوصيلية النوعية للنحاس المعالج المعياري الدولي : $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$

١ - ٣ - ٣ الأنواع المختلفة للمقاومات

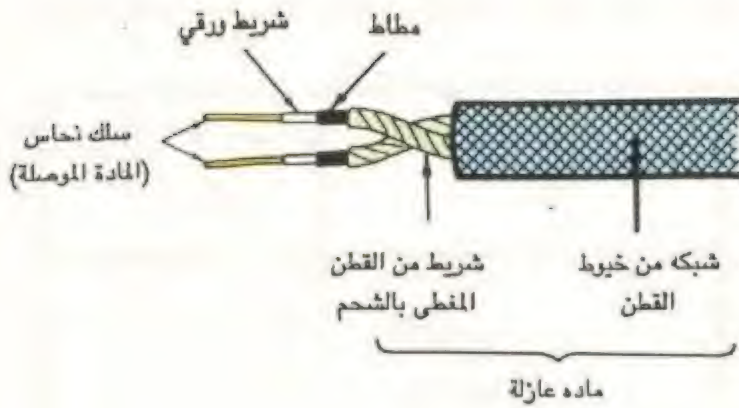
يوضح الشكل ١ - ٢٠ المقاومة النوعية لمواد مختلفة عند درجة الحرارة العادية، ومن هذا الشكل يتبين لنا أن المواد التي تكون مقاومتها النوعية أقل من 10^{-4} أوم . متر يطلق عليها الموصلات لأنها توصل التيار الكهربائي بسهولة . أما المواد التي تزيد مقاومتها النوعية على 10^4 أوم . متر؛ فهي تسمى مواد عازلة لصعوبة توصيلها للتيار الكهربائي . أما أشباه الموصلات التي سنتناولها فيما بعد فتكون قيم مقاومتها النوعية متوسطة بين الموصلات والمواد العازلة .



الشكل ١ - ٢٠ المقاومة النوعية لمواد مختلفة

أ - مقاومة العزل Insulation resistance

تُستخدم المواد العازلة لمنع مرور أو تسرب التيار الكهربائي غير المرغوب في مروره . فعلى سبيل المثال في الأسلاك المستعملة في التوصيلات الكهربائية للمنازل يكون كل من السلكين المستخدمين مغطى بمادة عازلة ويتم تجميعهما أحياناً في غلاف واحد . أما بالنسبة لخطوط نقل القدرة العالية فتستخدم مادة البورسلين (الخزف) كعازل .



أ - مادة عازلة مستخدمة في خطوط نقل القدرة

ب - مثال لسلك معزول مغلف بمادة قطنية

الشكل ١ - ٢١ استخدامات المواد العازلة

إن تغطية الموصلات بالمواد العازلة ووضعها داخل الكوابل يجعل التيار المتسرب عند وجود فرق جهد عالٍ قليلاً للغاية . وهذا التيار المتسرب يمر من خلال جزء من المادة العازلة تكون مقاومته النوعية صغيرة نسبياً نتيجة لوجود شوائب المادة العازلة أو قلة سمكها عن باقي الأجزاء .

ويطلق على النسبة بين فرق الجهد والتيار المتسرب اسم " مقاومة العزل " . فإذا كانت قيمة الجهد V فولت والتيار المتسرب I_0 أمبير؛ فإن مقاومة العزل R (بالأوم) تتحدد من العلاقة:

$$R = \frac{V}{I_0} \quad (\Omega)$$

(1 - 25)

ويوضح الجدول ١ - ٥ المقاومة النوعية لبعض أنواع المواد العازلة . وهذه المقاومة النوعية تتغير تغيراً ملحوظاً بتغير الحرارة فهي تقل حينما تزيد الحرارة والعكس بالعكس .

المقاومة النوعية ($\Omega.m$)	المادة	المقاومة النوعية ($\Omega.m$)	المادة
$10^{10} \sim 10^{11}$	كلوروبرين	$10^{13} \sim 10^{17}$	البرافين
10^{13}	الميكال (قالب)	$5 \times 10^{12} \sim 10^{13}$	راتينج صلب من البولي
$10^{10} \sim 10^{12}$	فلدسبار من الصيني		فينيل كلورايد
أكبر من 10^{16}	زجاج الكوارتز	أكبر من 10^{14}	بوليثيلين
		$10^{15} \sim 10^{19}$	بوليستر
		$10^{13} \sim 10^{15}$	المطاط الطبيعي

الجدول ١ - ٥ المقاومة النوعية للمواد العازلة (عند درجة حرارة الغرفة) .

ب - مقاومة الطرف الأرضي ومقاومة التلامس

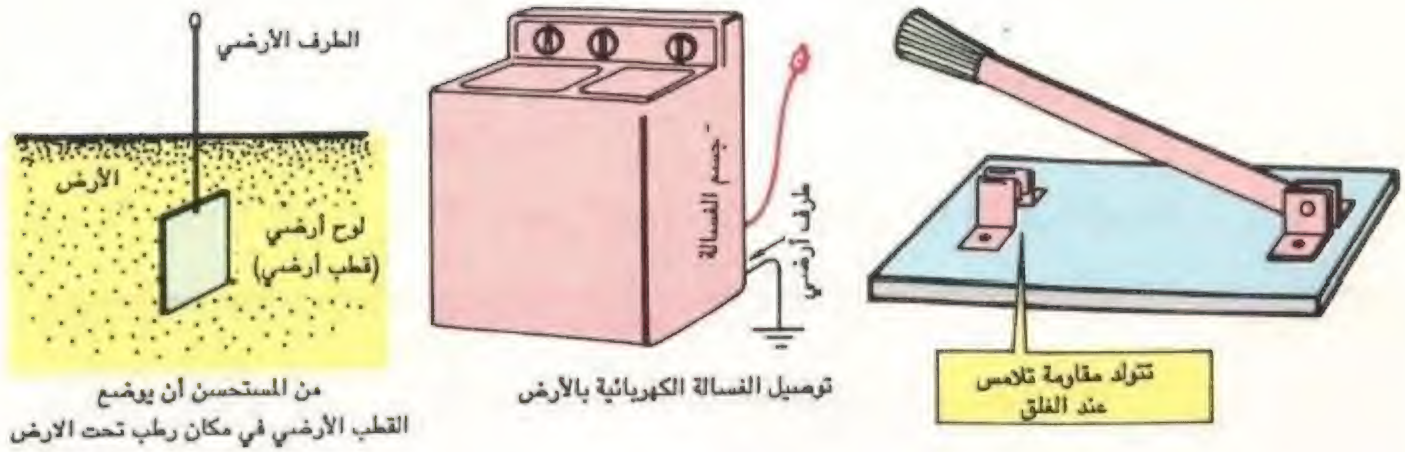
Grounding and contact resistance

عادة ما يتم توصيل طرف من الآلة الكهربائية عن طريق سلك موصل بلوح معدني مدفون تحت سطح الأرض، ويسمى هذا الطرف بالطرف الأرضي، ويكون الغرض منه منع حوادث الصدمات الكهربائية . وتكون مقاومة الأرض هي المقاومة بين اللوح المدفون والأرض . وفي أغلب الأحوال ينص القانون على وجوب توصيل الطرف الأرضي وبيان طريقة توصيله . ويستثنى من ذلك بعض الحالات الخاصة * .

أما المقاومة الناتجة عن تلامس جزء من موصلين، مثل تلامس سلكين أو تلامس موصل مع

فتحة منبع التيار (القابس) مثلاً ، هذه المقاومة تسمى بمقاومة التلامس .

وفي حالة عدم حدوث التلامس بصورة كاملة (نتيجة لسوء التثبيت مثلاً) فإن ذلك يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الجزأين المتلامسين ومرور تيار ** مما يؤدي إلى عدم اتصال أو عدم تجانس التوصيل نتيجة لأكسدة جزء من السطح الملامس ، وقد يؤدي ذلك إلى حدوث حرائق . ويجب أن تكون مقاومة التلامس أقل ما يمكن .

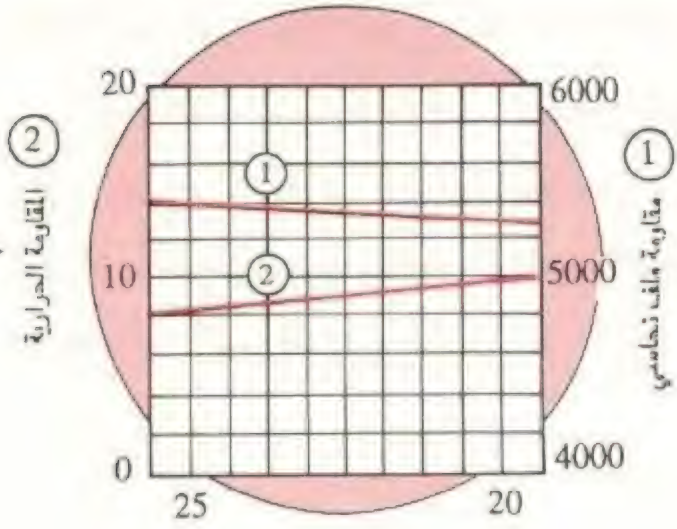


الشكل ١ - ٢٢ مقاومة الطرف الأرضي ومقاومة التلامس .

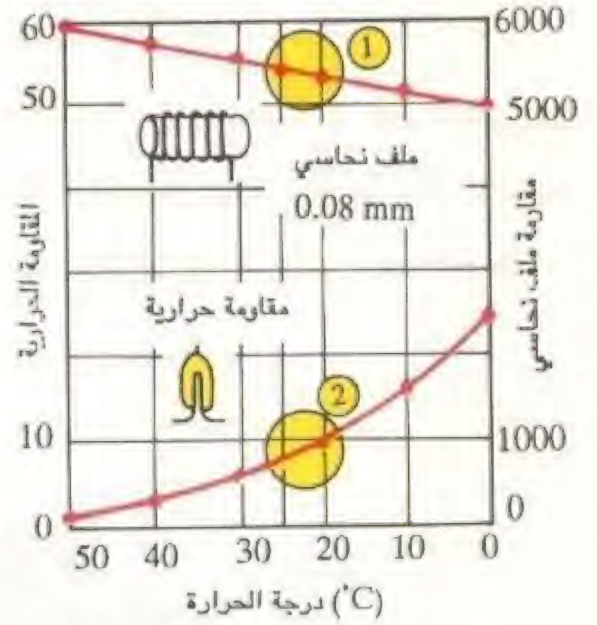
١ - ٣ - ٤ درجة الحرارة وتأثيرها على المقاومة

Temperature and electric resistance

عادة ما تتغير مقاومة المادة تغيراً ملحوظاً مع تغير درجة الحرارة . وبالنسبة للمعادن ، عادة تزيد المقاومة مع زيادة الحرارة . وعلى العكس من ذلك فإن المواد غير المعدنية مثل أشباه الموصلات والكربون والمحلول الإلكتروليتي لها خاصية انخفاض المقاومة مع ارتفاع درجة الحرارة *** .



درجة الحرارة (°C)
ب - جزء مكبر من الشكل أ



أ - منحنى المقاومة مع درجة الحرارة

الشكل ١ - ٢٣ منحنى العلاقة بين درجة الحرارة والمقاومة للمادة

* المقصود هنا التعليمات القياسية الهندسية للأجهزة الكهربائية .

** التيار المار في المقاومة يسبب طاقة حرارية . وهذا ما يعرف بحرارة " جول "

*** تزداد اهتزازات ذرات المعدن باكتسابها للطاقة الحرارية بزيادة درجة الحرارة .

ونتيجة لذلك تصبح حركة الإلكترونات الحرة بين الذرات أكثر صعوبة، وينتج عن ذلك زيادة المقاومة . ولكن بالنسبة لأشباه الموصلات والمحاليل الإلكترونية فيكون لها كمية قليلة نسبياً من الإلكترونات الحرة في الحالة العادية ، ويزداد عدد هذه الإلكترونات الحرة بزيادة درجة الحرارة وتصبح الإلكترونات نشطة مما ينتج عنه انخفاض المقاومة .

المعامل الحراري هو النسبة بين الزيادة في المقاومة لكل ارتفاع مقداره درجة مئوية واحدة للحرارة إلى القيمة الأصلية للمقاومة . ويكون المعامل الحراري لمقاومة المواد المعدنية موجباً

بينما يكون سالباً للمواد غير المعدنية نظراً لانخفاض مقاومتها تبعاً لارتفاع درجة الحرارة .
ويوضح الشكل ١ - ٢٣ مثالين لمنحنى العلاقة بين درجة الحرارة والمقاومة للنحاس والمقاومة الحرارية . فإذا كانت مقاومة موصل عند درجة حرارة t_1 درجة مئوية مقدارها R_{t1} أوم ، ثم أصبحت R_{t2} عندما زادت درجة الحرارة إلى t_2 درجة مئوية تكون الزيادة في المقاومة لكل درجة مئوية تساوي:

$$\frac{R_{t2} - R_{t1}}{t_2 - t_1} \quad (\Omega/^{\circ}\text{C})$$

ويكون المعامل الحراري (ويرمز له بالرمز α_{t1}) للمقاومة هو نسبة زيادة المقاومة لكل درجة مئوية واحدة ، ويعبر عنه بالعلاقة الآتية بقسمة الزيادة في المقاومة لكل درجة حرارة واحدة على القيمة الأصلية للمقاومة :

$$\alpha_{t1} = \frac{\frac{R_{t2} - R_{t1}}{t_2 - t_1}}{R_{t1}} = \frac{R_{t2} - R_{t1}}{R_{t1} (t_2 - t_1)} \quad (^{\circ}\text{C}^{-1}) \quad (1 - 26)$$

فإذا كانت مقاومة موصل عند درجة حرارة t_1 مقدارها R_{t1} أوم ، وكان المعامل الحراري عند درجة الحرارة هذه يساوي α_{t1} ؛ فإن قيمة المقاومة عند درجة حرارة t_2 تعطى من العلاقة التالية المستنتجة من المعادلة (1 - 26) :

$$R_{t2} = R_{t1} [1 + \alpha_{t1} (t_2 - t_1)] \quad (\Omega) \quad (1 - 27)$$

وهذه العلاقة بين درجة الحرارة وقيمة المقاومة تمكننا من معرفة درجة الحرارة بقياس قيمة مقاومة موصل . وفي الجدول ١ - ٦ توجد قيم المعامل الحراري للمقاومة والمقاومة النوعية للمعادن .

المعدن	المقاومة النوعية $\rho [\Omega.m]$		المعامل الحراري للمقاومة (20~100°C) $\alpha_{20}^* [^{\circ}C^{-1}]$
	(20°C) ρ_{20}	(100°C) ρ_{100}	
	$\times 10^{-8}$	$\times 10^{-8}$	$\times 10^{-3}$
الزنك	5.9	7.8	4.0
الألمنيوم	2.75	3.55	3.6
الذهب	2.4	2.88	2.5
الفضة	1.62	2.08	3.5
التنجستن	5.5	7.3	4.1
الحديد	9.8	14.7	6.3
النحاس	1.72	2.23	3.7
البلاتين	10.6	13.6	3.5

$$* \alpha_{20} = \frac{R_{100} - R_{20}}{80 R_{20}} = \frac{\rho_{100} - \rho_{20}}{80 \rho_{20}} \quad [^{\circ}C^{-1}]$$

الجدول ٦ - ١ المقاومة النوعية للمعادن والمعامل الحراري للمقاومة .

مثال ٤

إذا كانت مقاومة سلك من النحاس 5 أوم عند درجة حرارة 20 درجة مئوية . احسب المقاومة عند درجة حرارة 100 درجة مئوية .

وذلك باستخدام قيمة المعامل الحراري للمقاومة لمادة النحاس المعطاة في الجدول ٦-١

الحل

المعامل الحراري للنحاس عند درجة 20 درجة مئوية (α_{20}) هو
 $\alpha_{20} = 3.7 \times 10^{-3} \quad (^{\circ}C^{-1})$

بفرض أن قيمة المقاومة عند 100 درجة مئوية هي R_{100} فيمكن حساب قيمتها من العلاقة (1-27) :

$$R_{100} = R_{20} \{ 1 + \alpha_{20} (100 - 20) \}$$

$$= 5 \times \{ 1 + 3.7 \times 10^{-3} \times (100 - 20) \} = 6.48 \Omega$$

سؤال ٢٠

إذا كانت مقاومة سلك من النحاس اللين هي 12.34 أوم عند 20 درجة مئوية .
احسب درجة حرارة السلك إذا أصبحت مقاومته 14.45 .

سؤال ٢١

مقاومة سلك من النيكل الكروم هي 20 أوم والمعامل الحرارى لمقاومته
 $0.4 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ عند درجة حرارة 1000 درجة مئوية . أحسب المقاومة عند 20
درجة مئوية .

أ- التوصيلية الكهربائية الفائقة Superconductivity

عند انخفاض درجة الحرارة إلى درجة تقترب من الصفر المطلق (-273) درجة مئوية
تصل مقاومة المعدن فجأة إلى الصفر، ويطلق على هذه الظاهرة التوصيلية الفائقة .
وقد تم اكتشاف عدد كبير من الأنواع الجديدة من المواد التى لها خاصية التوصيلية
الفائقة مؤخراً . وبعض تلك العناصر يصل إلى حالة التوصيلية الفائقة عند درجة حرارة أكبر
من (-100) درجة مئوية .

وفى حالة التوصيلية الفائقة تمر تيارات دائرية بصفة مستمرة وإلى ما لانهاية وذلك نتيجة
لانعدام المقاومة، ويولد ذلك مجالاً مغناطيسياً حول التيار يمكننا من صناعة مغناطيس قوي .
وتستخدم هذه الخاصية فى تسيير القطارات على الوسائد المغناطيسية .



الشكل ١ - ٢٤ قطار يسير على وسادة مغناطيسية .

والقطار الذي نراه في الشكل ١ - ٢٤ هو قطار تجريبي طراز MLU001 يستخدم في خطوط ميازاكي التجريبية في اليابان.

١ - ٤ التأثير الحراري للتيار والقدرة الكهربائية Electric power

١ - ٤ - ١ حرارة " جول " Joule heat

عندما يمر تيار كهربائي في مقاومة ؛ فإنه يولد طاقة حرارية وهذه الطاقة الحرارية تعرف باسم حرارة جول * .

فعلى سبيل المثال السخان الكهربائي يولد حرارة جول . وهذه الحرارة تتناسب مع حاصل ضرب مربع شدة التيار في المقاومة ، وهذا هو ما يعرف بقانون جول .

جيمس بريسكوت جول : (١٨١٨ - ١٨٨٩)

عالم فيزياء بريطاني ، وهو الابن الثاني لصانع مشروبات ولد في مدينة سالفورد بإنجلترا .

فى عام ١٨٣٠ تحركت أول قاطرة بخارية من مانشستر إلى ليفربول، وفى هذه الأثناء كان جول يفكر فى إمكانية استخدام الطاقة الكهرومغناطيسية بدلاً من البخار . ولكنه توصل إلى أن هذا لا يمكن تحقيقه. ولهذا فقد حوّل اهتمامه إلى دراسة الشغل الميكانيكى والقياسات الحرارية اثناء تشغيل الماكينات . وفى عام ١٨٤٠ اكتشف قانون يتعلق بالتأثير الحرارى للتيار الكهربائى .

ثم نشر بالإضافة إلى ذلك بحثاً علمياً فى عام ١٨٤٣ يتعلق بتحويل الطاقة الميكانيكية إلى حرارة مما ساعد على تطور نظرية الديناميكا الحرارية .
ووحدة قياس الشغل (وهى الجول الذى يرمز له بالرمز J) سميت كذلك نسبة إليه.

وحدة قياس الحرارة هي الجول الذى يرمز له بالرمز (J) .

والجول الواحد يعبر عن كمية الطاقة الحرارية التى تتولد عند مرور تيار كهربائى شدته 1 أمبير فى مقاومة قيمتها 1 أوم لمدة ثانية واحدة، وهى أيضاً كمية الحرارة نفسها التى ترفع درجة حرارة 1 كجم من الماء بمقدار $\frac{1}{4.19 \times 10^3}$ أى 0.24×10^{-3} درجة مئوية ** .

فإذا افترضنا أن فرقاً فى الجهد مقداره V فولت موجود بين طرفي مقاومة قيمتها R أوم مما يسبب تياراً شدته I أمبير لزمان مقداره T ثانية ؛ فإن الطاقة الحرارية المتولدة H [جول] يمكن التعبير عنها بالعلاقة التالية :

$$H = RI^2t = VIt \quad (J)$$

(1 - 28)

سؤال ٢٢

بفرض أن سلكاً كهروحرارياً يسمح بمرور تيار مقداره 4 أمبير عند وجود فرق جهد مقداره 100 فولت .

احسب قيمة الطاقة الحرارية المتولدة نتيجة لمرور التيار في هذا السلك الكهروحراري لمدة دقيقة واحدة .

* تتولد حرارة جول نتيجة لتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية تنشأ عن تصادم الإلكترونات بالنواة في الموصل الكهربائي .

** يتطلب رفع درجة حرارة جرام واحد من الماء بمقدار درجة مئوية واحدة طاقة حرارية مقدارها 4.19 جول .

١ - ٤ - ٢ القدرة والطاقة الكهربائية Electric Power and Energy

عندما نسلط فرق جهد على حمل كهربائي ينشأ عند ذلك سريان تيار كهربائي، ويمكن لهذا التيار أن يؤدي وظائف عديدة مثل إدارة موتور عن طريق تحويل الطاقة الكهربائية إلى أخرى ميكانيكية ، أو الإنارة بتحويلها إلى طاقة ضوئية أو تسخين سلك - النيكل كروم الموجود في السخان الكهربائي عن طريق تحويلها إلى طاقة حرارية .

وتعرف القدرة الكهربائية بمقدار الشغل المبذول في وحدة الزمن ووحدة قياس القدرة الكهربائية هي الواط ورمزه (W) . والقدرة الكهربائية التي قيمتها 1 (واط) تعني بذل شغل مقداره 1 جول لمدة ثانية واحدة . لذلك يمكن كتابة مقدار القدرة الكهربائية P (بالواط) الناشئة عن مرور تيار مقداره I أمبير بين طرفين فرق الجهد بينهما V فولت على الصورة التالية :

$$P = VI (W)$$

(1 - 29)

أما الطاقة الكهربائية ووحدة قياسها الجول (J) فهي مقدار الشغل الذى يبذله التيار في زمن ما، ويعبر عنها بحاصل ضرب القدرة في الزمن . فإذا كانت القدرة هي P (وات) والزمن t ثانية والطاقة الكهربائية هي W_p (جول) في الزمن t، فيمكن التعبير عن الطاقة بالمعادلة :

$$W_p = Pt = VIt \text{ (J)} \quad (1 - 30)$$

وعلى الرغم من أن وحدة قياس الطاقة الكهربائية هي الجول (وات . ثانية)؛ فإن وحدة الـ (وات . ساعة) التي يرمز لها بـ (W.h) أو الكيلووات ساعة (kW.h) هي الوحدات المستخدمة عادة . ويوضح الجدول ١ - ٧ وحدات قياس القدرة الكهربائية والطاقة الكهربائية .

العلاقة بين الوحدات	رمز الوحدة	وحدة القياس	الكمية
$1 \text{ mW} = \frac{1}{1000} \text{ W} = 10^{-3} \text{ W}$ $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W} = 10^3 \text{ W}$	mW	مللي وات	القدرة
	W	وات	الكهربائية
	kW	كيلووات	
$1 \text{ W.s} = 1 \text{ J}$ $1 \text{ W.h} = 3600 \text{ W.s}$ $= 3.6 \times 10^3 \text{ W.s}$ $= 3.6 \times 10^3 \text{ J}$ $1 \text{ kW.h} = 1000 \times 3600 \text{ W.s}$ $= 3.6 \times 10^6 \text{ W.s}$ $= 3.6 \times 10^6 \text{ J}$	J	جول	الطاقة
	W.s	وات ثانية	الكهربائية
	W.h	وات ساعة	
	kW.h	كيلووات ساعة	

الجدول ١ - ٧ وحدات قياس القدرة الكهربائية والطاقة الكهربائية .

سؤال ٢٣

كمية من الماء وزنها 1.5 كجم ودرجة حرارتها 20 درجة مئوية . احسب الوقت اللازم لرفع درجة حرارتها إلى 60 درجة مئوية عند استخدام سخان كهربائي قدرته 400 وات ، وعند استخدام سخان آخر قدرته 1000 وات .

افتراض أنه ليس هناك فقد في الطاقة وأن رفع درجة حرارة 1 كجم من الماء لدرجة مئوية واحدة يتطلب 4.19×10^3 جول .

سؤال ٢٤

عند استخدام مكواة كهربائية . افترض أن المقاومة 25 أوم عندما يكون فرق الجهد 100 فولت واحسب القدرة المستهلكة . احسب الطاقة الكهربائية عند استخدام المكواة باستمرار لمدة ساعة . أوجد الناتج بالجول وبالكيلووات . ساعة .

١ - ٤ - ٣ تطبيقات على حرارة " جول "

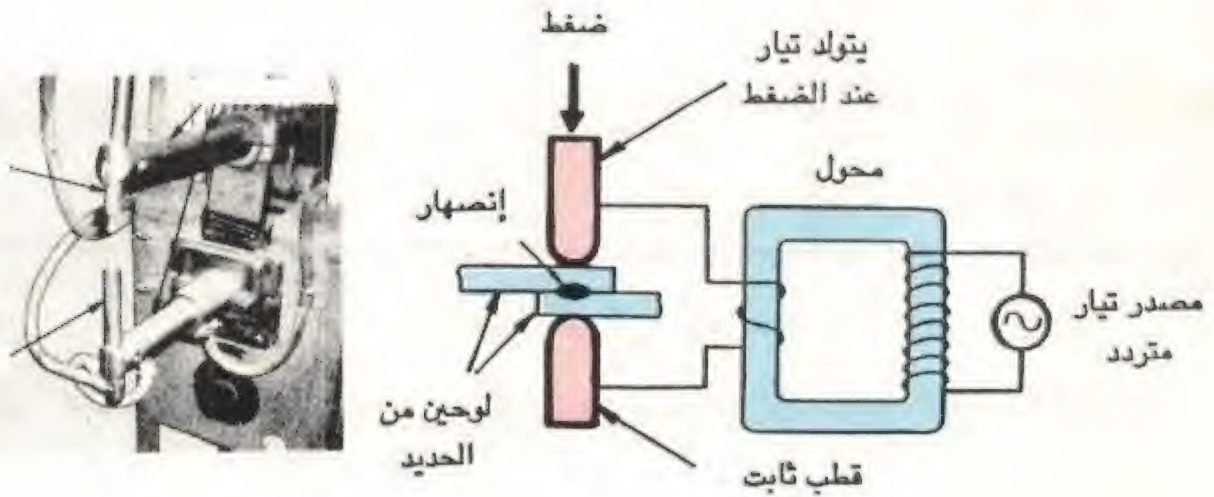
تسمى المواد التي تولد حرارة جول بالمواد ذات القدرة على التسخين . ويعد النيكل كروم مثلاً على المواد المعدنية ذات القدرة على التسخين، ومن أنواعه السلك الغني بالكروم والسلك المصنوع من الحديد والكروم . والنيكل كروم مادة ذات قدرة احتمال عالية وتتحمل التسخين لدرجات مرتفعة . أما السلك المصنوع من النيكل والحديد فإنه يضعف عند استخدامه في درجات حرارة عالية باستمرار . ومثل هذه المواد ذات القدرة على التسخين تستخدم في السخانات الكهربائية والأفران الكهربائية بعد أن تصنع على شكل ملف ويتم عزلها .

ومن أمثلة المواد غير المعدنية ذات القدرة على التسخين مواد مثل القماش المغطى بكاربونات السليكون . وصمغ الإيبوكسي المضاف إليه مسحوق الكربون .

ويتم استخدام مثل تلك المواد في صناعة الوسائد والأغطية الكهربائية .
ومن التطبيقات الأخرى استخدام الفيوزات وقواطع الدوائر الكهربائية لكي تمنع حدوث
الخرائق أو تتسبب في إتلاف المعدات أو التوصيلات الكهربائية . ومنها أيضاً اللحام بالقوس
الكهربائي باستخدام الحرارة المتولدة من التيار الكهربائي .

لحام النقطة Spot welding

يتم صهر شريحة المعدن في المكان المراد توصيله كي تلتصق بالشريحة الأخرى عن طريق
إمرار تيار كبير جداً لمدة قصيرة مع ضغط المعدن لتحقيق التلامس والالتصاق بين
الشريحتين .



الشكل ١ - ٢٥ لحام النقطة

١ - ٤ - ٤ أعلى تيار مسموح به Allowable current

عند مرور تيار في أسلاك التوصيل الكهربائية تتولد طاقة حرارية نتيجة للمقاومة الصغيرة للأسلاك مما يرفع درجة حرارة السلك . وقد ينتج عن ذلك تلف المادة العازلة التي تغطي السلك.

ولمنع تلف هذه المادة العازلة لابد من تحديد قيمة التيار الذي يمكن أن يمر بدون إتلافها . وأعلى قيمة للتيار لا تسبب تلفاً للمادة العازلة تسمى بالتيار المسموح . ويبين الجدول ٨-١ التيار المسموح بالنسبة للأسلاك المغطاة بمادة الفينيل .

سلك مفرد		سلك مبروم	
القطر [mm]	شدة التيار القصوى [A]	المساحة الفعلية للمقطع [mm ²]	شدة التيار القصوى [A]
أقل من 1.2 أكبر من 1.0	16	أقل من 1.25 أكبر من 0.9	17
أقل من 1.6 أكبر من 1.2	19	أقل من 2 أكبر من 1.25	19
أقل من 2.0 أكبر من 1.6	27	أقل من 3.5 أكبر من 2	27
أقل من 2.6 أكبر من 2.0	35	أقل من 5.5 أكبر من 3.5	37
أقل من 3.2 أكبر من 2.6	48	أقل من 8 أكبر من 5.5	49

الجدول ٨ - ١

شدة التيار القصوى للأسلاك المغطاة بالفينيل (عند درجة حرارة محيطه أقل من 30° م)

١ - ٥ الظاهرة الكهروحرارية Thermoelectric phenomenon

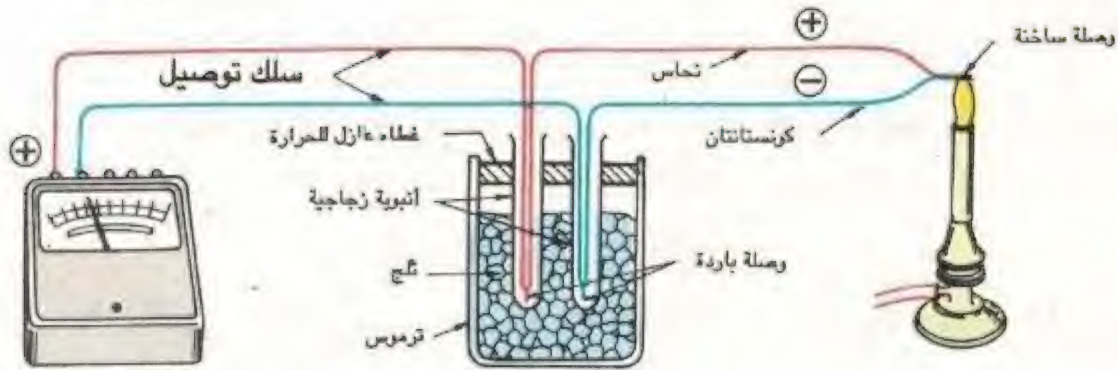
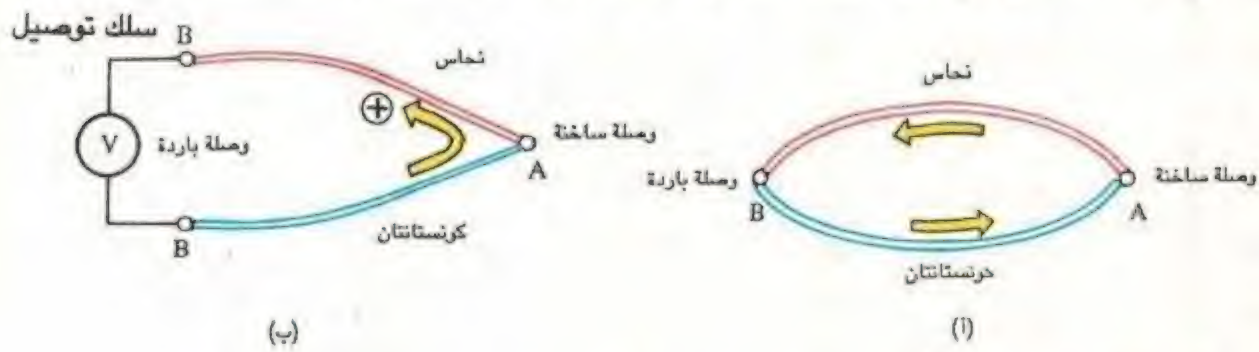
إذا كان لدينا سلكين من معدنين مختلفين، وقمنا بتوصيلهما في نقطة معينة ثم أغلقنا الدائرة كما في الشكل ١ - ٢٦ فإننا نلاحظ أن تغيير درجة الحرارة عند نقطة التوصيل يولد

قوة دافعة كهربية وينتج عن ذلك مرور تيار كهربائي . هذا التيار الكهربائي يؤدي إلى ظاهرتين إحداهما طاردة للطاقة والثانية ممتصة للطاقة عند نقطتي التوصيل ؛ وهاتان الظاهرتان تسميان بالظاهرة الكهروحرارية .

١ - ٥ - ١ تأثير سيبك Seebeck effect

عند توصيل معدنين مختلفين كما في الشكل ١-٢٦ (أ) وتسخين الطرف A (ويعرف باسم الوصلة الدافئة) وتبريد الطرف B (ويعرف باسم الوصلة الباردة) تتولد قوة دافعة كهربائية ويمر تيار . وتسمى هذه القوة الدافعة الكهربائية بالقوة الدافعة الكهروحرارية بينما يسمى التيار المار بالتيار الكهروحراري . وتسمى تلك الوصلة التي تجمع بين معدنين مختلفين بالازدواج الحراري .

وتسمى هذه الظاهرة بتأثير سيبك نسبة إلى العالم الألماني سيبك (١٧٧٠ - ١٨٣١) .



الشكل ١ - ٢٦ تولد القوة الدافعة الكهروحرارية

عند الفصل بين المعدنين المكونين للازدواج الحراري، وتوصيلهما بسلك إلى جهاز قياس كما نرى في الشكل ١ - ٢٦ (ب) فإن القوة الدافعة الكهربائية تظل ثابتة إذا احتفظنا بدرجة حرارة الوصلة ثابتة ، ويسمى المعدن المستخدم في التوصيل بالمعدن الوسيط .

ويبين الجدول ١ - ٩ فرق درجات الحرارة والقوة الدافعة الكهروحرارية المناظرة للازدواج الحراري Thermocouple .

فرق درجات الحرارة [°C]	R*		K*		T*	
	سبيكة من البلاتين - الروديوم (+)	البلاتين (-)	سبيكة تتكون رئيسياً من النيكل والكروم (+)	نيكل (-)	نحاس (+)	نيكل ونحاس (-)
100	0.67		4.095		4.277	
200	1.468		8.137		9.286	
300	2.400		12.207		14.860	
400	3.407		16.395		20.869	
500	4.471		20.640			
600	5.582		24.902			
700	6.741		29.128			
800	7.949		33.277			
900	9.203		37.325			
1000	10.503		41.269			

الجدول ١ - ٩ فرق درجات الحرارة والقوة الدافعة الكهروحرارية للازدواج الحراري

(وحدة القياس [mV])

* الحروف R , K , T تبين الانواع ، وهي مقسمة تبعاً لمادة السلك المعدني للازدواج الحراري .
وكمثال ، الحرف R يشير إلى الازدواج الحراري ذي السلك المعدني المصنوع من سبيكة من البلاتين - الروديوم ، والبلاتين .

١- المقياس الكهروحراري Thermoelectric thermometer

مما سبق معرفته عن العلاقة بين فرق درجات الحرارة والقوة الدافعة الكهروحرارية نجد أن الأزواج الحرارية مع جهاز مللي فولتيميتر يمكن استخدامها معاً كترموومتر (مقياس حرارة). وذلك بقياس العلاقة بين فرق درجات الحرارة والقوة الدافعة الكهروحرارية، وتغيير تدريج الفولتيميتر من تدريج بالفولت إلى تدريج بدرجات الحرارة. ومثل هذا الترموومتر يسمى الترموومتر الكهروحراري، وهو يستخدم في قياس درجات الحرارة العالية جداً مثل درجة حرارة فرن كهربائي مثلاً.



الشكل ١ - ٢٧ الترموومتر الكهروحراري

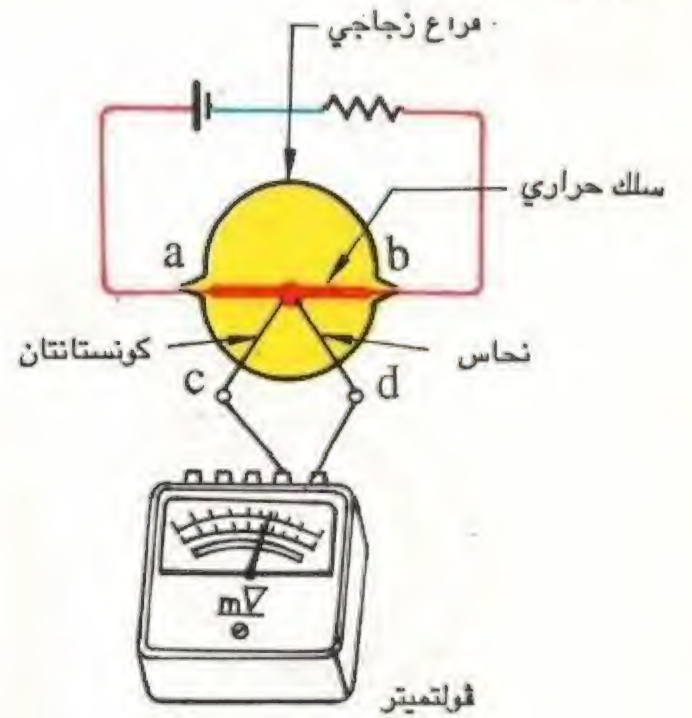
ب- الأميتر الحراري Thermo - ammeter

في الشكل ١ - ٢٨ نشاهد أزواجاً حرارياً متصلاً مع سلك حراري في معزل عن الهواء في غلاف زجاجي مفرغ. وكما نرى في الشكل ١ - ٢٨ (ب) يتم توصيل جهاز فولتيميتر مع أميتر حراري ليمكننا من قياس شدة التيار المار في السلك الحراري a و b ويكون ذلك كالآتي :

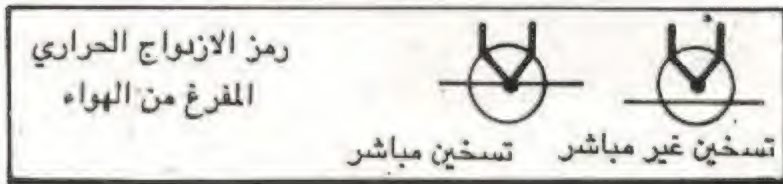
عندما يمر التيار الكهربائي في السلك الحراري تتولد طاقة حرارية تتناسب مع مربع شدة التيار كما في قانون جول . وهذه الطاقة ترفع درجة حرارة السلك الحراري ، وبالتالي وصلة الازدواج الحراري فتتولد قوة دافعة كهروحرارية . هذه القوة الدافعة الكهربائية المتولدة يتم قياسها بواسطة الفولتميتر ، فيكون قياس التيار قد تم عن طريق قياس الارتفاع في درجة الحرارة .



أ - الازدواج الحراري المفرغ من الهواء



ب - دائرة القياس



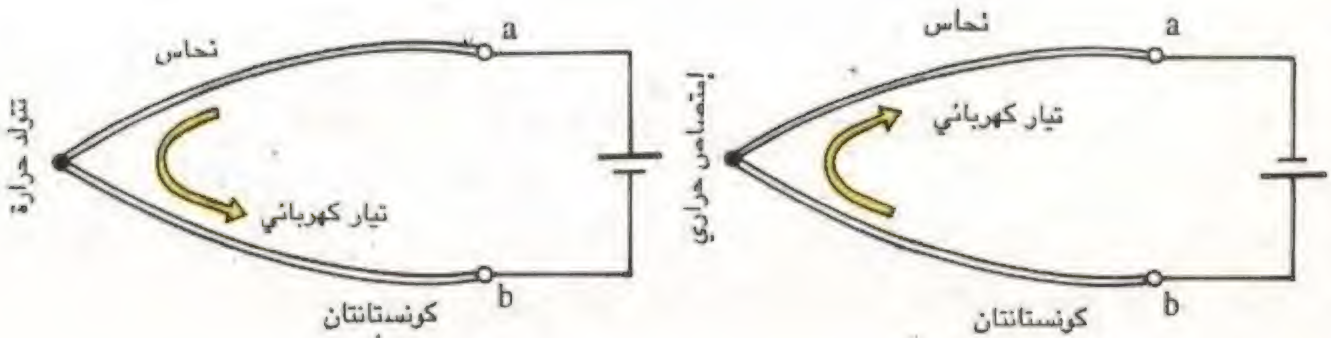
الشكل ١ - ٢٨ الأميتر الحراري

والأميتر الحراري جهاز يقيس شدة التيار عند الترددات العالية* وتسمى أجهزة القياس مثل الأميتر الحراري - والترمومتر الكهروحراري بأجهزة قياس الازدواج الحراري لاعتمادها على الازدواج الحراري في فكرة عملها .

١ - ٥ - ٢ تأثير بلتيير Peltier effect

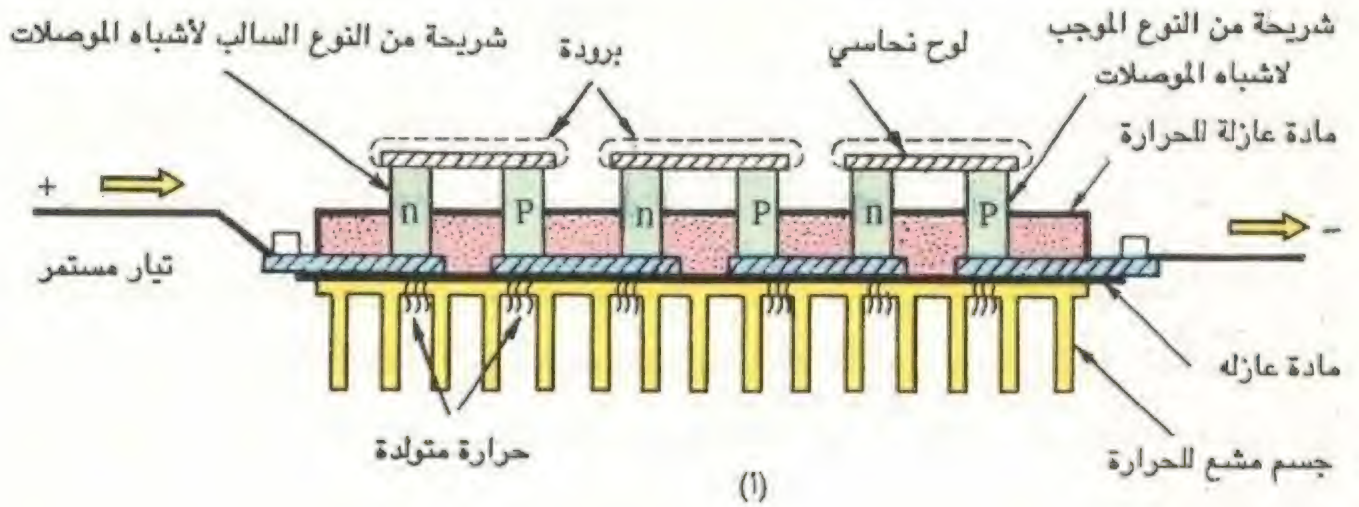
وهي الظاهرة العكسية لظاهرة سيبك - أي إن مرور التيار في معدنين مختلفين ينتج عنه تأثيرين أحدهما طارد للحرارة والآخر ممتص للحرارة عند وصليتي المعدنين .

فإذا وصلنا سلكاً من النحاس مع سلك من الكونستانتان مثلاً كما في الشكل ١-٢٩؛ فإنه عند مرور تيار من النحاس إلى الكونستانتان تتولد طاقة حرارية عند نقطة اتصال المعدنين وعلى العكس . وإذا قمنا بعكس اتجاه التيار من سلك الكونستانتان إلى سلك النحاس فإن ذلك ينتج عنه امتصاص حرارة في نقطة التوصيل، وقد اكتشف هذه الظاهرة العالم الفيزيائي الفرنسي بلتيير (١٧٨٥ - ١٨٤٥ م) وسميت باسمه .



الشكل ١-٢٩ ظاهرة بلتيير .

عند توصيل عدد من أشباه الموصلات نوع - p ، وأشباه الموصلات من نوع n ** على التوالي بواسطة شرائح من النحاس كما في الشكل ١-٣٠، فإن ذلك يزيد من التبريد عند سريان تيار في الوصلات، وهذا ما يسمى بالتبريد الإلكتروني ومثل هذا الجهاز يسمى جهاز كهروحراري .



(I)



(B)

الشكل ١-٣ جهاز كهرو حراري للتبريد بالكهرباء

* يتأثر قياس شدة التيار في الترددات العالية تأثيراً كبيراً بقيمة التردد، ولذا يستخدم جهاز قياس كهروحراري (كالأميتر الحراري) نظراً لقلّة تأثره بالتردد .

** بعض أشباه الموصلات مثل البيزموت (Bi) * والأنتيمون (Sb) يتضح فيها تأثير بلتير بشكل أكبر ، وسوف نقوم بدراسة أشباه الموصلات في الفصل السادس .

١ - ٦ التأثير الكيميائي للتيار الكهربائي والبطارية

من الصعب مرور تيار كهربائي في الماء النقي ؛ لأن مقاومته الكهربائية عالية جداً، ولكن إذا أضفنا بعض الملح إلى الماء وغمسنا فيه قطبين أحدهما موجب والآخر سالب متصلين بمصدر

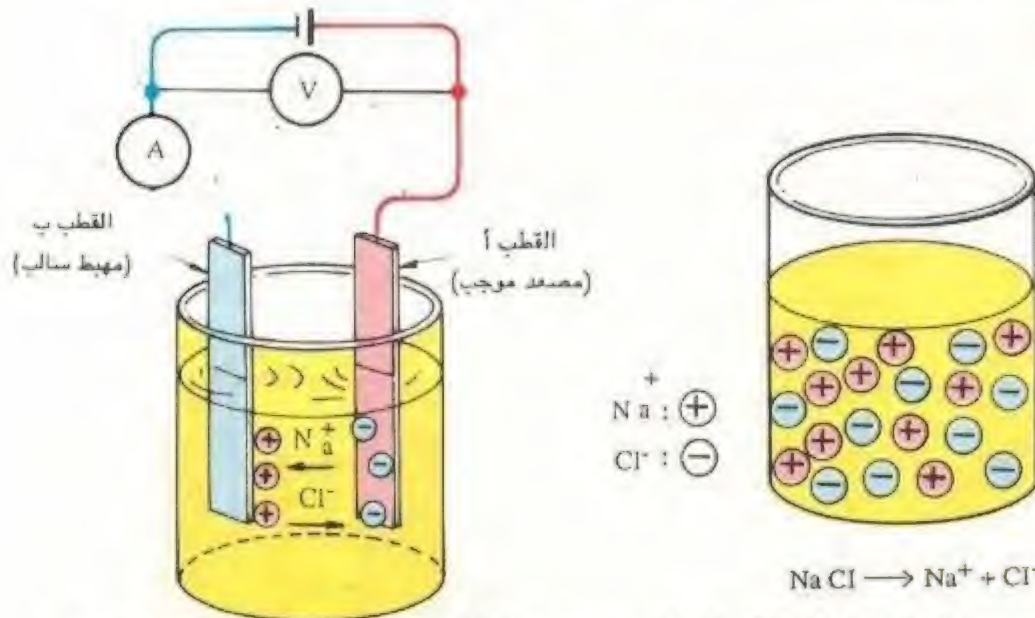
تيار مستمر فسوف يمر تيار في المحلول الملحي، وينتج عن ذلك تفاعلات كيميائية عديدة عند سطح الإلكترود .

١ - ٦ - ١ المحلول الإلكتروليتي والأيونات

Electric Solution and Ions

عند إذابة ملح الطعام (كلوريد الصوديوم NaCl) في الماء فإن جزيء كلوريد الصوديوم ينقسم الى أيون صوديوم موجب Na^+ وأيون كلور سالب Cl^- .

ويقصد بالتأين انقسام الجزيء المتعادل كهربائيا من مادة ما الى جسيم يحمل شحنة موجبة ويسمى كاتيون وآخر يحمل شحنة سالبة ويسمى أنيون ؛ كما في الشكل ١-٣١ (أ) والمواد سهلة التأين مثل ملح الطعام يطلق على محلولها في الماء اسم إلكتروليت .



أ - محلول ملح الطعام (الكتروليت) ب - حركة الشحنات الكهربائية عن طريق الأيونات

الشكل ١-٣١ الإلكتروليت والأيونات

عند وضع قطبين من البلاتين في محلول ملح كما الموضح في الشكل ١-٣١ (أ) وتوصيلهما بمصدر للتيار المستمر، كما في الشكل ١-٣١ (ب) فإن القطب الموجب A سوف يجذب

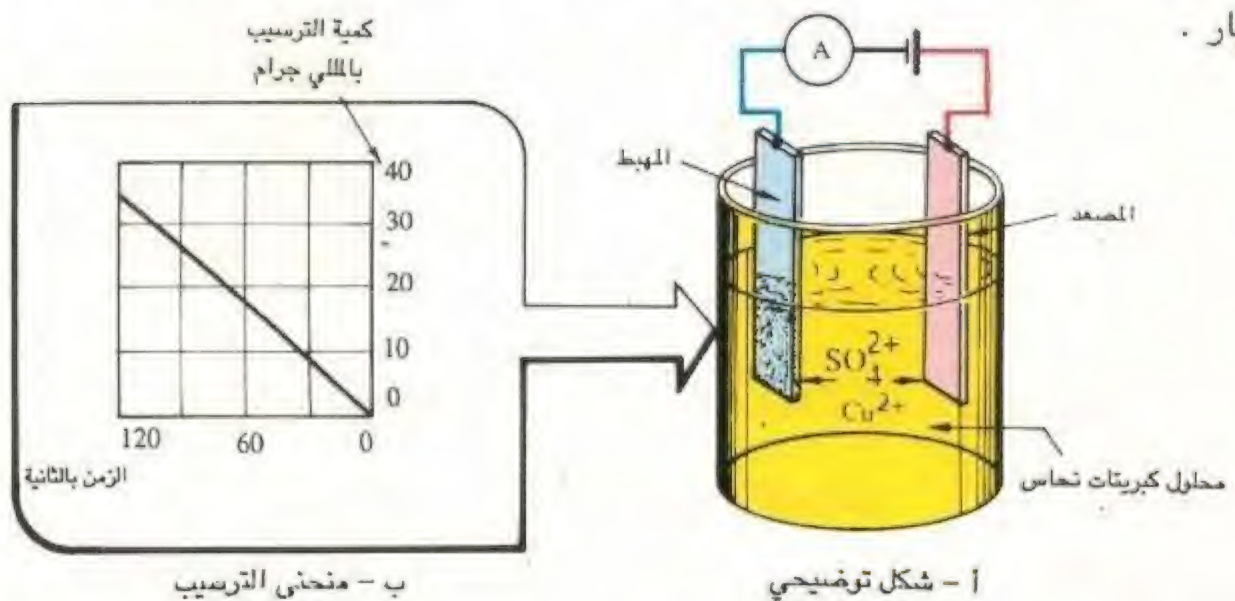
أيونات الكلور السالبة Cl^- ويفقدها إلكتروناتها الزائدة حتى تتحول إلى كلور Cl_2 متعادل. والقطب السالب B سوف يجذب أيونات الصوديوم الموجبة، وتكتسب هذه الأيونات شحنات سالبة من القطب تجعلها متعادلة كهربائياً وتحولها إلى صوديوم Na.

وبالتالي يتفاعل الصوديوم مباشرة مع الماء H_2O الموجود في المحلول الإلكتروليتي مكوناً هيدروكسيد الصوديوم NaOH.

ويعتمد التحليل الكهربائي على ظاهرة تحلل الإلكتروليت كيميائياً بواسطة التيار الكهربائي عن طريق التيار الكهربائي المار فيه وهو مجال تطبيقي واسع يشمل الطلاء بالمعادن والترسيب

١ - ٦ - ٢ قانون فاراداي Faraday's law

عند مرور تيار كهربائي في محلول كبريتات النحاس في وجود أقطاب من البلاتين (كما في الشكل ١ - ٣٢) فإن القطب السالب (المهبط) يتحول إلى لون النحاس بمرور الوقت . وهذا التغير يرجع إلى ترسب النحاس الناتج عن تعادل أيونات النحاس الموجبة Cu^{2+} التي تنجذب إلى المهبط (الكاثود)، وتزيد كمية النحاس المترسب مع مرور الوقت أو بزيادة شدة التيار .



الشكل ١ - ٣٢ تجربة الترسيب النحاسي

فإذا كانت شدة التيار المار هي I أمبير وزمن مروره t ثانية ومقدار المادة المترسبة w جرام فاننا نحصل على العلاقة التالية :

$$w = KIt \text{ (g)} \quad (1-31)$$

حيث K ثابت تناسب يعبر عن كمية المادة المترسبة نتيجة لمرور شحنة كهربائية مقدارها 1 كولوم، ويسمى الثابت الكهروكيميائي .

وقد اكتشف فاراداي القانونين التاليين نتيجة لتجاربه التي أثبتت أن كمية المادة المترسبة بالتحليل الكهربائي تتناسب مع كمية الشحنات الكهربائية التي تحملها الأيونات

(١) تتناسب كمية المادة المترسبة مع كمية الشحنات الكهربائية المارة خلال الإلكتروليت .

(٢) عند تساوي كمية الشحنات الكهربائية المارة خلال الإلكتروليت - تتناسب كمية المادة

المترسبة بالتحليل الكهربائي مع المكافئ الكيميائي أي $\frac{\text{الوزن الذري}}{\text{التكافؤ}}$ وهو ما يعرف بقانون فاراداي للتحليل الكهربائي .

ميشيل فاراداي (١٧٩١ - ١٨٦٧)

عالم فيزياء وكيمياء بريطاني والده كان يعمل حداداً ، ولد في ضواحي لندن وعمل في تجليد الكتب عندما كان عمره ١٣ عاماً وظهر حماسه للعلم وقراءته للكتب العلمية . وفي الثانية والعشرين من عمره عمل في معهد العلوم الملكي حيث بدأ حياته كعالم . وكان من أوائل أعماله في مجال الكيمياء إسالة الكلور واكتشاف البنزين (وهو زيت خفيف يشتعل بلهب نظيف) . وفي عام ١٨٢١ اكتشف ظاهرة الحث الكهرومغناطيسي التي تأسست عليها التقنية الكهربائية الحديثة . وبالإضافة إلى ذلك كانت له إنجازات مهمة مثل اكتشاف قوانين التحليل الكهربائي .

وقد اشتقت وحدة قياس السعة الكهربائية (الفاراد - يرمز له بـ (F)) من اسمه .

ويوضح الجدول ١ - ١٠ قيم الوزن الذري والتكافؤ والمكافئ الكهروكيميائي لعدد من الذرات، ويبين أيضاً الترسيب الناتج عن كمية من الشحنات مقدراها 1 أمبير . ساعة = 3600 كولوم .

الذرة	الأيون	الوزن الذري	التكافؤ	المكافئ الكهروكيميائي [mg/C]	الترسيب [g/(A.h)]
الفضة	Ag ⁺	107.8682	1	1.117975	4.02471
النحاس	Cu ⁺⁺	63.546	2	0.32930	1.1855
النيكل	Ni ⁺⁺	58.69	2	0.3041	1.095
الزنك	Zn ⁺⁺	65.39	2	0.3389	1.220
الصوديوم	Na ⁺	22.989768	1	0.238272	0.85778
الأكسجين	O ⁻⁻	15.9994	2	0.082911	0.29848
الكلور	Cl ⁻	35.4527	1	0.367441	1.32279

الجدول ١ - ١٠ المكافئ الكهروكيميائي

سؤال ٢٥

احسب وزن النحاس المترسب (بالجرام) نتيجة مرور تيار شدته 20 أمبير في محلول كبريتات النحاس لمدة 30 دقيقة .

سؤال ٢٦

احسب كمية الشحنة الكهربائية (بالكولوم) اللازمة لترسيب 10 جرامات من الفضة عند إمرارها في محلول نترات فضة .

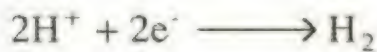
١ - ٦ - ٣ البطاريات Battery

البطارية هي أداة تستخدم للحصول على طاقة كهربائية ناتجة من تفاعل كيميائي . وتنقسم البطاريات الى بطاريات أولية وبطاريات ثانوية . البطاريات الأولية هي البطاريات التي لا يمكن إعادة شحنها بعد تفريغ طاقتها الكهربائية أول مرة . أما البطاريات الثانوية فيمكن إعادة شحنها بإعطائها طاقة كهربائية (أي شحنها) من الخارج بعد نفادها .

١ - البطاريات الأولية

حينما نغمس لوحين أحدهما من النحاس (Cu) والآخر من الزنك (Zn) في محلول مخفف لحمض الكبريتيك (كما هو مبين بالشكل ١ - ٣٣) . ثم نوصل اللوحين (القطبين) بأميتر ومصباح صغير ؛ فإننا نشاهد تحرك مؤشر الأميتر وإضاءة المصباح . وسبب هذه الظاهرة * هو أن الزنك ذو قابلية شديدة للتأين ، وهو يذوب في المحلول الإلكتروليتي، ويعطى أيونات موجبة Zn^{++} وتتبقى إلكترونات سالبة $2e^{-}$ تتحرك في الموصل حتى ينتقل إلى قطب النحاس ذي القابلية الضعيفة للتأين . وتبلغ قيمة القوة الدافعة الكهربائية المتولدة بين القطبين (النحاس : القطب الموجب ، والزنك : القطب السالب) نحو 1.1 فولت ، وتسمى هذه البطارية ببطارية فولتا .

وفي بطارية فولتا يقوم أيون الهيدروجين الموجب H^{+} في المحلول الإلكتروليتي بالاتحاد مع الإلكترونات من النحاس باستمرار لنحصل على التفاعل :

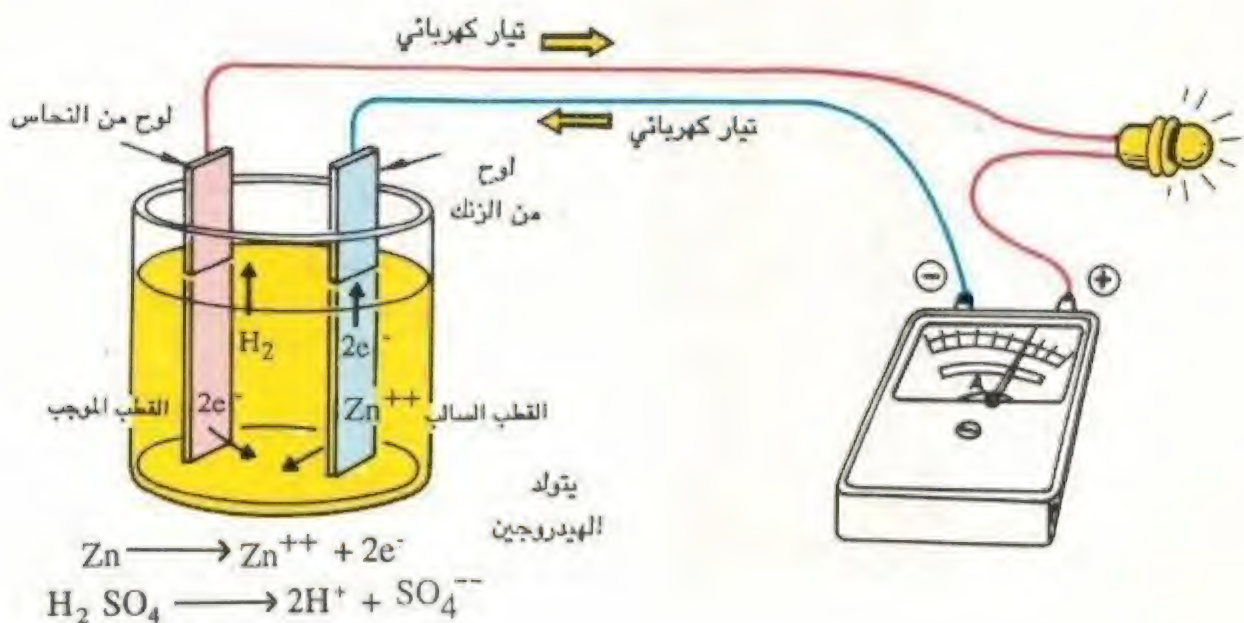


مما ينتج عنه تغطية سطح القطب الموجب بالهيدروجين المتولد ، وهذا الغطاء الهيدروجيني يمنع مرور التيار .

* بعض العناصر الكيميائية مثل الهيدروجين وبعض المعادن لها قابلية للتأين حيث أنه من السهل على هذه العناصر أن تفقد إلكترونات لتصبح أنيونات . والترتيب التصاعدي لقابلية التأين هو : البوتاسيوم K والكالسيوم Ca والصوديوم Na والمغنسيوم Mg والألمنيوم Al والزنك Zn والحديد Fe والنيكل Ni والقصدير Sn والرصاص Pb و(الهيدروجين) (H)، والنحاس Cu والزنك Hg والفضة Ag والبلاتين Pt والذهب Au والكربون (C) .

إلساندرو فولتا

عالم كهروكيمياويات إيطالي ولد من عائلة في كومو بشمال إيطاليا. كان مهتماً بدراسة الكيمياء والكهرباء، وقد قام بدراسة فرق جهد التوصيل بين موصل مبتل ومعدن ، وفي عام ١٧٩٩ ابتكر العامود الفولتي الذي جعل أول تيار من صنع الإنسان يسري في سلك وفي عام ١٨٠٠ نشر بحثاً عن البطارية كان طفرة جديدة في مجال الكهرباء وقد تولى منصب الرئيس الشرفي لقسم العلوم بجامعة بافيا Pavia واستمر في أبحاثه حتى وافته المنية في معمله بمدينة كومو عام ١٨٢٧ م. ووحدة قياس فرق الجهد (وهي الفولت) مشتقة من اسمه .



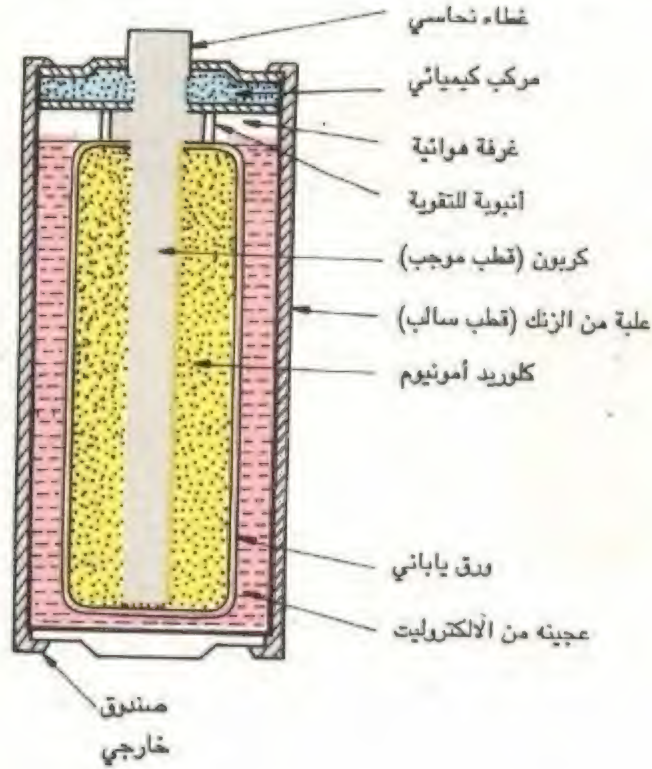
الشكل ١ - ٢٣ الخلية القلوية Voltaic cell

القوة الدافعة الكهربائية المسببة لانخفاض القوة الدافعة الكهربائية في الخلية تعرف بظاهرة الاستقطاب .

ولمنع الاستقطاب يتم تحويل الهيدروجين المتكون على سطح القطب إلى ماء عن طريق إضافة عامل مؤكسد إلى الإلكتروليت . ويسمى هذا العامل المؤكسد بممانع الاستقطاب .

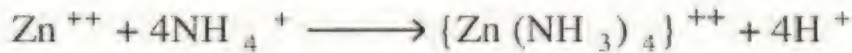
ومن أمثلة موانع الاستقطاب أكاسيد المعادن مثل ثاني أكسيد المنجنيز.

وفي الوقت الحاضر انتشر استعمال بطاريات الماغنسيوم الجافة، المبينة في الشكل ١ - ٢٤، وفيها يستخدم عمود من الكربون كقطب موجب واسطوانة من الزنك كقطب سالب، ويستخدم كلوريد الأمونيوم NH_4Cl كإلكتروليت حيث يتم خلطه مع النشا لعمل عجينة . كما يستخدم ثاني أكسيد المنجنيز كممانع للإستقطاب .



الشكل ١ - ٣٤ بطارية الماغنسيوم الجافة

وتوضح المعادلات الكيميائية التالية التفاعلات التي تتم في بطاريات الماغنسيوم الجافة .
القطب السالب :



عند القطب الموجب :



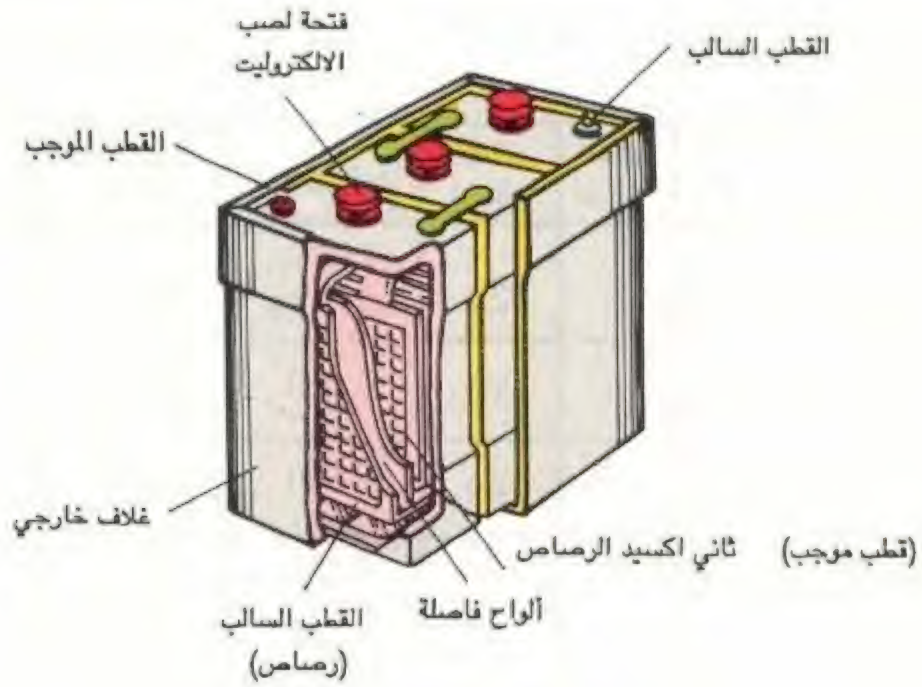
ويوضح الجدول ١ - ١١ أنواع البطاريات الجافة مقسمة حسب نوع الإلكترود والإلكتروليت ومانع الاستقطاب .

النوع	القطب الموجب	القطب السالب	الإلكتروليت	مانع الاستقطاب	القوة الدافعة الكهربائية
بطارية جافة (منجنيز)	C	Zn	$ZnCl_2$ NH_4Cl	MnO_2	1.5 ~ 1.7
بطارية جافة (منجنيز قلوي)	C	Zn	KOH	MnO_2	1.4
بطارية (زئبق)	Ni	Zn	KOH	HgO	1.34 ~ 1.35
بطارية فوق أكسيد الفضة (فضة)	Ag	Zn	KOH	AgO	1.7
بطارية وستن (القياسية)	Hg	Cd	$CdSO_4$	Hg_2SO_4	1.0183

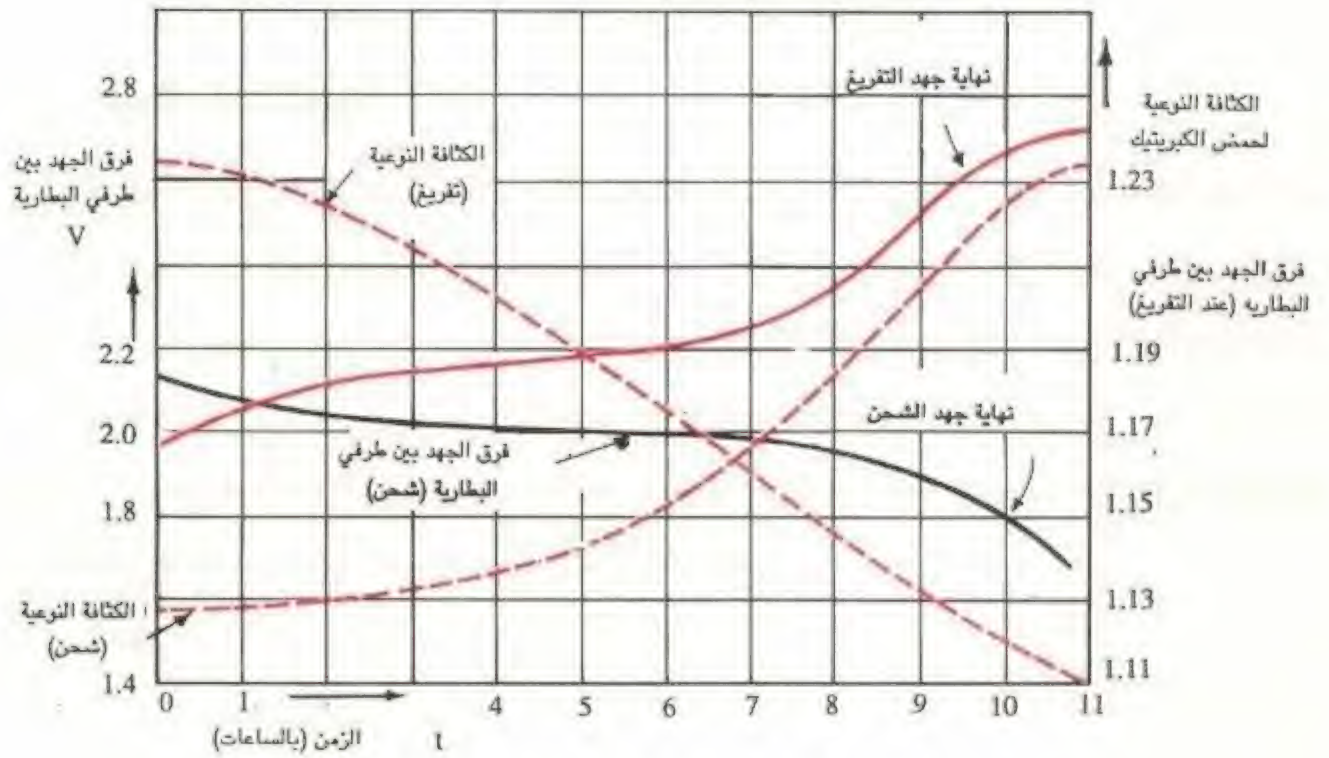
الجدول ١ - ١١ أنواع مختلفة من البطاريات الأولية

ب - البطاريات الثانوية

من أمثلة البطاريات الثانوية شائعة الاستخدام بطارية الرصاص وهي موضحة بالشكل ١ - ٣٥ . ويستخدم فيها محلول مخفف من حمض الكبريتيك ذي كثافة نوعية 1.2 - 1.3 . والقطب الموجب بها يصنع من ثاني أكسيد الرصاص PbO_2 في حين يصنع القطب السالب من الرصاص Pb ويوضع فيها فاصل لمنع تلامس القطبين الموجب والسالب . وبطارية الرصاص تعطي قوة دافعة كهربائية مقدارها 2 فولت؛ وأحياناً يتم توصيل عدد من البطاريات على التوالي للحصول على الجهد المطلوب في وعاء واحد .



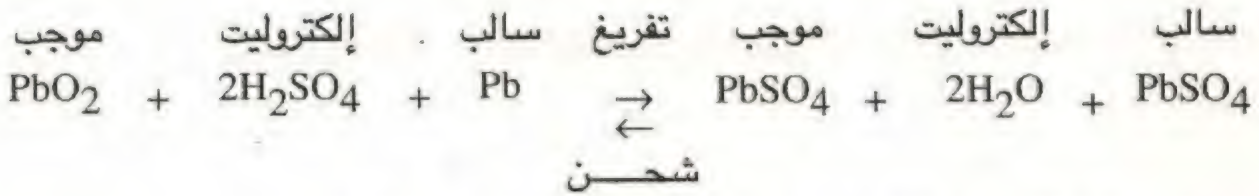
الشكل ١ - ٣٥ بطارية الرصاص



الشكل ١ - ٣٦ منحنى العلاقة بين جهد البطارية والزمن

أثناء شحن وتفريغ بطارية الرصاص .

ويكون التغير الكيميائي في البطارية كما يلي :



ويوضح الشكل ١ - ٣٦ تغير جهد البطاريات مع الزمن أثناء شحن وتفريغ البطارية . وكما هو واضح في الشكل فإن التفريغ المستمر للبطارية يحول الرصاص الموجود في كل من اللوحين إلى كبريتات رصاص مما يؤدي إلى تخفيف محلول حمض الكبريتيك، ويقلل من القوة الدافعة الكهربائية تدريجيا .

لهذا يجب أن تتم إعادة الشحن عندما يصل جهد البطارية الى 1.8 فولت وتخفض الكثافة النوعية إلى 1.15.

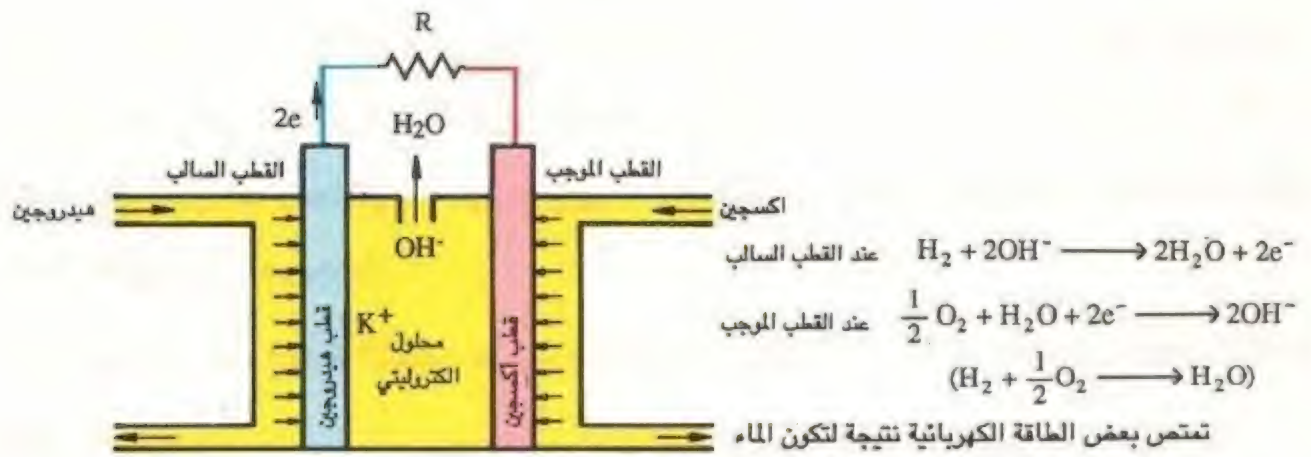
ويسمى هذا الجهد بجهد التفريغ النهائي، وحينما يصل الجهد أثناء الشحن إلى 2.7 فولت فإن الاستمرار في الشحن لا يؤدي إلى زيادة في الجهد ، وإنما يتولد عنه أكسجين من القطب الموجب وهيدروجين من القطب السالب . ويسمى هذا الجهد بجهد الشحن النهائي . ويتم التعبير عن سعة البطارية بحاصل ضرب شدة التيار عند التفريغ في الزمن . ووحداتها الأمبير ساعة ويرمز لها بـ A.h فعلى سبيل المثال إذا تم التفريغ بتيار شدته 10 أمبير لمدة 10 ساعات فإن سعة هذه البطارية تبلغ 100 أمبير . ساعة .

ح- البطارية القلوية Alkali battery

وفيها يستخدم محلول قلوي مثل هيدروكسيد البوتاسيوم KOH كإلكترويت . ومن أمثلتها النيكل كادميوم، وهي بطاريات واسعة الانتشار صلبة ، ويمكن إعادة شحنها كما أنها سهلة الحمل أيضا .

د - الخلية التي تعمل بالوقود Fuel cell

يمكن استخدام الطاقة المخزنة في الوقود وتحويلها مباشرة إلى طاقة كهربائية من خلال التفاعل الكيميائي في هذه الخلية. وعند مقارنتها بالبطاريات العادية ، نجد أنها أقل فقداً للطاقة .



الشكل ١ - ٣٧ خلية تعمل بالوقود هيدروجين - أكسجين

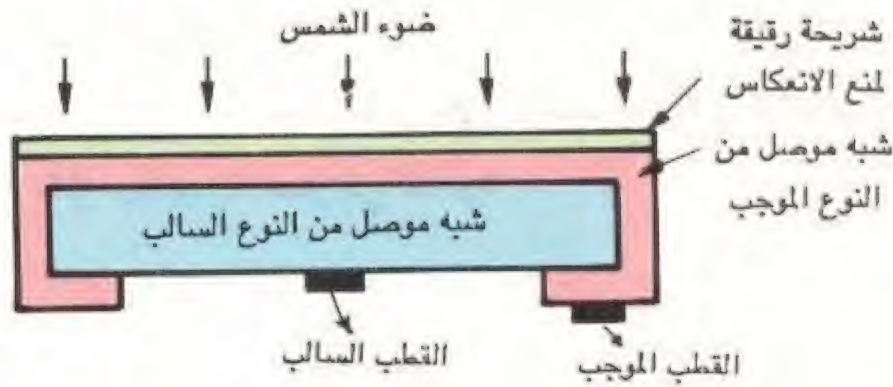
ويبين الشكل ١ - ٣٧ خلية تعمل بوقود الهيدروجين ، ويستخدم فيها الأكسجين كمساعد على الاحتراق . وتستخدم أقطاب مسامية موجبة وسالبة موضوعة بحيث تحصر بينها الالكتروليت . والالكتروليت في هذه الحالة يتكون من محلول من هيدروكسيد البوتاسيوم KOH ، ويتم إضافة الأكسجين الى القطب الموجب، والهيدروجين الى القطب السالب من الخارج ، وتبلغ قيمة القوة الدافعة الكهربائية المتولدة نحو 1 فولت وكفاءة تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية حوالي 60 - 70% . وقد استخدمت مثل هذه الخلايا في سفن الفضاء ومكوك الفضاء .

يعبر عن سعة بطاريات الرصاص المستخدمة في السيارات بمعدل الـ 20 ساعة .

ويبلغ قيمة فرق الجهد في متوسط 20 ساعة نحو 12 فولت، ويبلغ جهد التفريغ النهائي حوالي 10.5 فولت .

هـ - الخلية الشمسية Solar cell

تقوم الخلية الشمسية بتحويل ضوء الشمس مباشرة الى طاقة كهربائية عن طريق أشباه الموصلات ، ويوضح الشكل ١ - ٣٨ دائرة توصيل الخلية الشمسية باستخدام صمام ثنائي مصنوع من تلامس قطعتين من السليكون إحداهما من النوع الموجب والاخرى من النوع السالب .

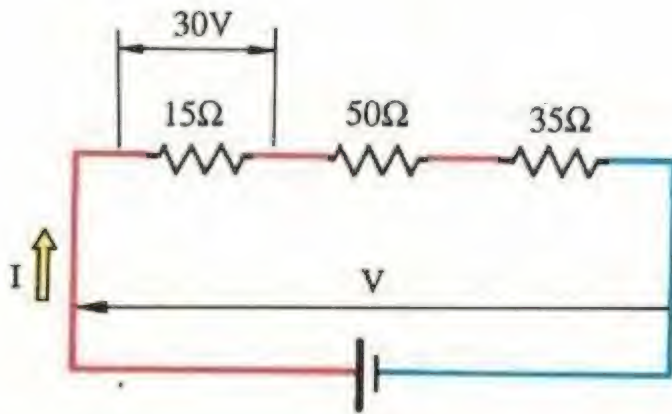


الشكل ١ - ٣٨ الخلية الشمسية المصنوعة من السليكون

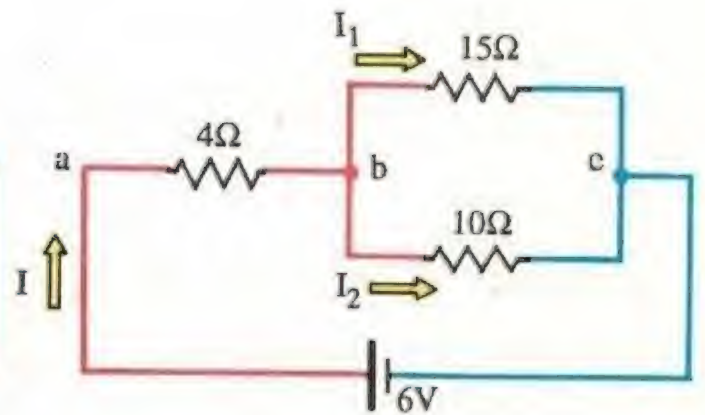
تبلغ طاقة مثل هذه الخلية 100 وات لكل متر مربع، وكفاءة تحويل الطاقة الضوئية الى كهربائية نحو 10 - 15%. وبالإضافة إلى ذلك تجرى الآن أبحاث بغرض إيجاد خلايا جديدة لها كفاءة تحويل أعلى مثل خلية تعمل ببلورات من كبريتيد الكاديوم Cd S .

تمارين

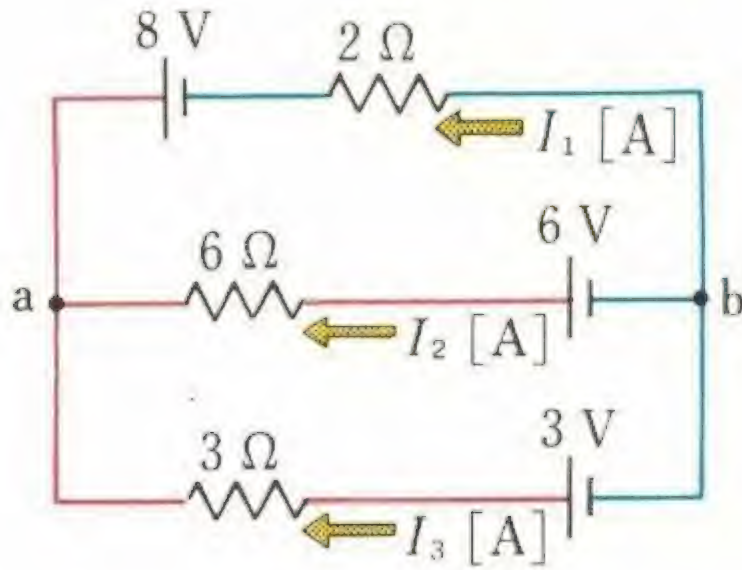
- ١ - إذا كان عندك موصل طوله 1 متر ومقاومته 3 أوم ، احسب مقاومة الموصل إذا تضاعف طوله نتيجة للشد . ثم احسب قيمة القطر الجديد بعد الشد .
- ٢ - احسب المقاومة المكافئة والتيار المار في الدائرة حينما يكون هناك مقاومتان 5 و 10 أوم متصلتان على التوالي بمصدر جهده 30 فولت ثم احسب فرق الجهد بين طرفي المقاومة 5 أوم .
- ٣ - بفرض أن هناك دائرة مكونة من 3 مقاومات 2 أوم و 5 أوم و 10 أوم على التوازي ، احسب شدة التيار المار في كل مقاومة ، وفرق جهد المصدر الكهربائي إذا كان التيار الكلي في الدائرة 50 أمبير .
- ٤ - في الشكل رقم ١ - ٣٩ احسب قيمة فرق الجهد بين a و b وبين c و b واحسب قيمة التيار I و I_1 و I_2 المار في الدائرة .



الشكل ١ - ٤٠



الشكل ١ - ٣٩



الشكل ١ - ٤١

- ٥ - في الشكل ١ - ٤٠ إذا كان فرق الجهد بين طرفي المقاومة 15 أوم مقداره 30 فولت عندما يكون فرق الجهد بين المقاومات الثلاث المتصلة على التوالي V فولت ، احسب التيار (I) المار في الدائرة وقيمة فرق الجهد V .
- ٦ - في الشكل ١ - ٤١ احسب شدة التيارات I_1 و I_2 و I_3 المارة في كل فرع .

الفصل الثاني

التيار الكهربائي والمغناطيسية

Electric Current and Magnetism

من الظواهر الكهربائية المعروفة أن المغناطيس يجذب قطع الحديد، كما أن القضيب المغناطيسي عند تعليقه في الهواء يتجه من الجنوب إلى الشمال. وعند تقريب مؤشر مغناطيسي إلى موصل به تيار جار فإن المؤشر يتأرجح . وتظهر المغناطيسية في المنطقة المحيطة بالتيار المار في موصل معين. كما أن تعرض الموصل المار به تيار، والموضوع في مجال مغناطيسي، لقوة معينة فإن هذه القوة تؤثر عليه . والمحرك المستخدم في السيارات والغسالات الكهربائية هو تطبيق لهذه الظاهرة .

كذلك عند تحريك موصل معين في مجال مغناطيسي تتولد قوة دافعة كهربائية في هذا الموصل . وتستخدم هذه الظاهرة في توليد الكهرباء في محطات توليد الكهرباء . كما أنه عند تغيير المجال المغناطيسي في ملف تتولد قوة دافعة كهربائية في الملف، ويعد محول الجهد هو تطبيق لهذه الظاهرة.

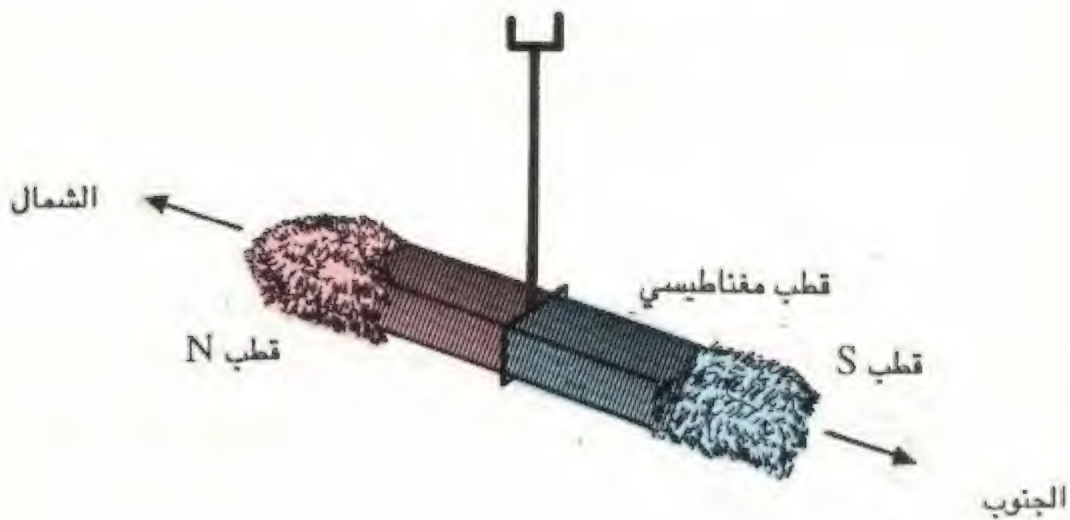
في هذا الفصل نقوم أولاً بدراسة خواص المغناطيس ثم نبحث في وظائف التيار الكهربائي والوظائف المختلفة المغناطيسية .

٢ - ١ المغناطيس وقانون كولوم Coulomb's law

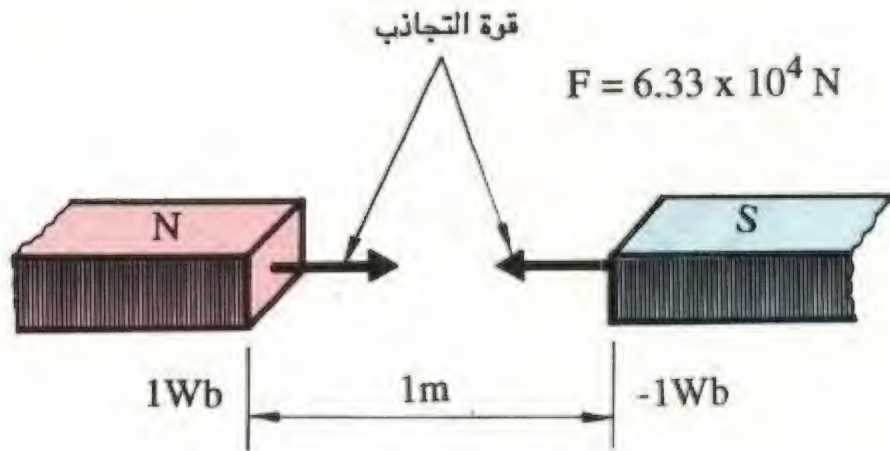
٢ - ١ - ١ المغناطيس والمغناطيسية Magnet and magnetism

يوجد من المغناطيس أنواع طبيعية مثل الماجنيثايت وأنواع صناعية مثل القضيب المغنط على شكل حرف U والإبرة المغناطيسية . ومن المعروف أن هذه المغناطيسات تجذب قطع الحديد وأن الإبرة المغناطيسية تبين اتجاه الجنوب والشمال . وهذه الخواص للمغناطيس تسمى الخواص المغناطيسية .

عند رش برادة الحديد على قضيب ممغنط فإنها تنجذب بشدة إلى طرفي المغناطيس كما في الشكل ٢ - ١ ، وذلك لأن أقوى جزء للمغناطيس يوجد عند طرفي المغناطيس أي أقطاب المغناطيس . والمغناطيس له دائماً قطبان مغناطيسيان قطب مغناطيسي في اتجاه الشمال يسمى قطب N ، أو القطب الموجب ؛ وقطب مغناطيسي آخر في اتجاه الجنوب ويسمى قطب S ، أو القطب السالب .



الشكل ٢ - ١ الأقطاب المغناطيسية Magnetic poles



الشكل ٢ - ٢ القوة المغناطيسية Magnetic Force

يبين الشكل ٢ - ٢ أنه عند تقريب القطب الشمالي (N) من القطب الجنوبي (S) لمغناطيس آخر تحدث قوة تجاذب بينهما، أما إذا كان القطبان متشابهين تحدث قوة تنافر . وبمعنى آخر الأقطاب المختلفة تتجاذب والأقطاب المتشابهة تتنافر . تسمى هذه القوى (القوى المغناطيسية) .

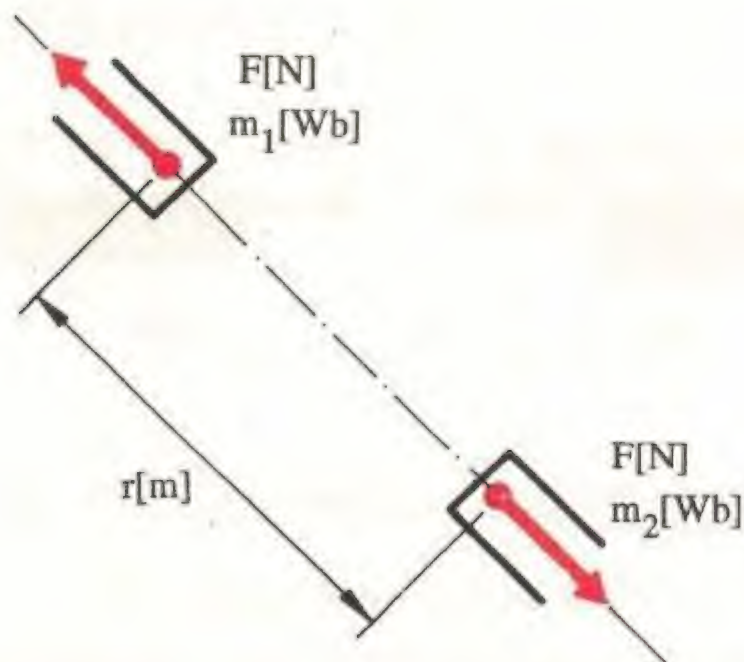
وحدة قياس شدة القطب المغناطيسي هي الويبر، ويرمز لها بالرمز [Wb] . وشدة 1 ويبر في قطب مغناطيسي هي قوة مغناطيسية قيمتها 6.33×10^4 نيوتن تؤثر على قطبين مغناطيسيين المسافة بينهما 1 متر ولهما الشدة نفسها في الفراغ .

٢ - ١ - ٢ قانون كولوم

نفترض أن لدينا قطبين مغناطيسيين قوتهما m_1 [Wb] ، m_2 [Wb] والمسافة بينهما r [m] كما في الشكل ٢ - ٣ ، يكون اتجاه القوة المغناطيسية F [N] بينهما على الخط المستقيم الواصل بين القطبين، وتكون قيمة هذه القوة المغناطيسية كما يلي :

$$F = \frac{1}{4 \pi \mu} \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [\text{N}] \quad (2-1)$$

وتسمى هذه العلاقة قانون كولوم .



الشكل ٢ - ٣ قانون كولوم للمغناطيسية

وتكون قوة القطب المغناطيسي m [Wb] موجبة في حالة قطب شمالي (N) ، وتكون سالبة في حالة قطب جنوبي (S) . وتؤدي القوة المغناطيسية $F(N)$ إلى تنافر إذا كانت موجبة، وإلى تجاذب إذا كانت قيمتها سالبة .

الثابت μ (النفاذية) يتحدد بنوع الوسط الموجود فيه القطب المغناطيسي . وفي الفراغ نجد أن $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] ، ويمكن كتابة المعادلة (2-1) في الفراغ كما يلي :

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_0} \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6.33 \times 10^{-4} \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [N] \quad (2-2)$$

مثال ١

إذا وضع قطبان مغناطيسيان قوتهما 2×10^{-6} ويبر ، 5×10^{-6} ويبر في الهواء ، وكانت المسافة بينهما 3 سم ، احسب القوة المغناطيسية المؤثرة عليهما .

الحل

نقوم بالتعويض في المعادلة (2-2) بالقيم الآتية :

$$m_1 = 2 \times 10^{-6} \text{ Wb} , \quad m_2 = 5 \times 10^{-6} \text{ Wb} , \quad r = 0.03 \text{ m}$$

فنحصل على :

$$F = 6.33 \times 10^{-4} \times \frac{2 \times 10^{-6} \times 5 \times 10^{-6}}{(0.03)^2} = 7.03 \times 10^{-4} \quad [\text{N}]$$

سؤال ١

إذا وضع قطبان مغناطيسيان قوتهما 1×10^{-6} ويبر ، 3×10^{-6} ويبر في الهواء ، وكانت المسافة بينهما 10 سم . احسب القوة المغناطيسية المؤثرة عليهما .

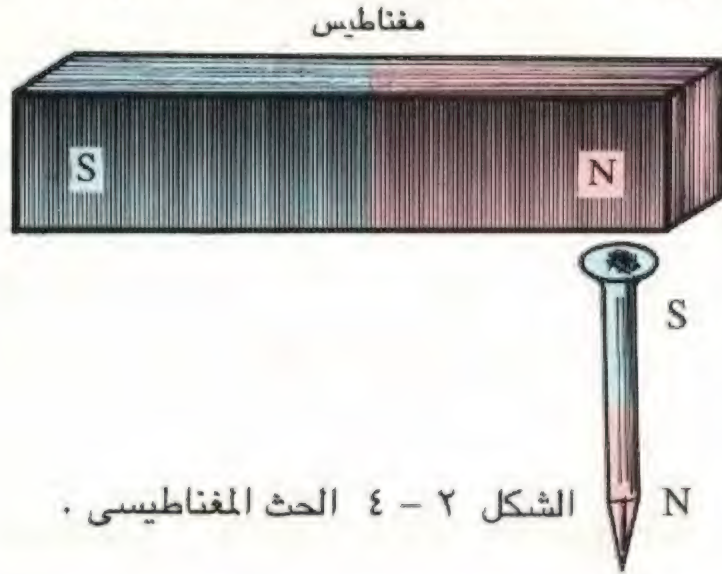
٢ - ١ - ٣ الحث المغناطيسي Magnetic induction

عند وضع قطعة حديدية مثل المسمار بالقرب من القطب الشمالي لمغناطيس يظهر بالقطعة الحديدية قطب جنوبي في النهاية القريبة من المغناطيس ، ويظهر قطب شمالي في الطرف البعيد عن المغناطيس كما في الشكل ٢ - ٤ . وتسمى هذه الظاهرة الحث المغناطيسي . أي إن القطعة الحديدية قد تمغنطت . ونتيجة الحث المغناطيسي انجذبت القطعة الحديدية إلى المغناطيس بسبب قوة التجاذب بين القطب (S) الذي ظهر على القطعة الحديدية وقطب (N) للمغناطيس .

تسمى المواد مثل الحديد والنيكل مواداً حديدية مغناطيسية ، وهي مواد قابلة للمغنطة باستخدام الحث المغناطيسى . وسوف ندرس ذلك في الفصل الثالث بالتفصيل.

٢ - ١ - ٤ المجال المغناطيسى وشدة المجال المغناطيسى

عند وضع مغناطيس بالقرب من مغناطيس آخر، أو بالقرب من قطعة حديدية تظهر القوة المغناطيسية، ولهذا يسمى الحيز الذي تعمل فيه القوة المغناطيسية بالمجال المغناطيسى .
عند وضع قطب موجب قوته 1 ويبر في مجال مغناطيسى كما في الشكل ٢ - ٦ (أ) فإن شدة المجال المغناطيسى واتجاهه* عند نقطة معينة يعبر عنه بقيمة واتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة على هذا القطب مع ملاحظة أن النفاذية في الهواء تساوي تقريباً μ_0 .



الشكل ٢ - ٤ الحث المغناطيسى .

المغناطيسية الأرضية Earth magnetism

تتجه الإبرة المغناطيسية دائماً بالقرب من إتجاه الجنوب والشمال، وذلك بسبب القوة المغناطيسية التي تؤثر على الإبرة وعلى الأرض (وهي مغناطيس كبير جداً) . والكرة الأرضية هي مغناطيس هائل له قطبان أحدهما بالقرب من القطب الشمالى الجغرافى (قطب S) ، والآخر بالقرب من القطب الجنوبي الجغرافى (قطب N) .

وعلى الأرض يوجد مجال مغناطيسي وفيه يخرج خط القوة المغناطيسية من قطب N ويتجه إلى قطب S . وهذه تسمى المغناطيسية الأرضية، وبوصلة التوجيه ما هي إلا تطبيق لهذه الخاصية للمغناطيسية .



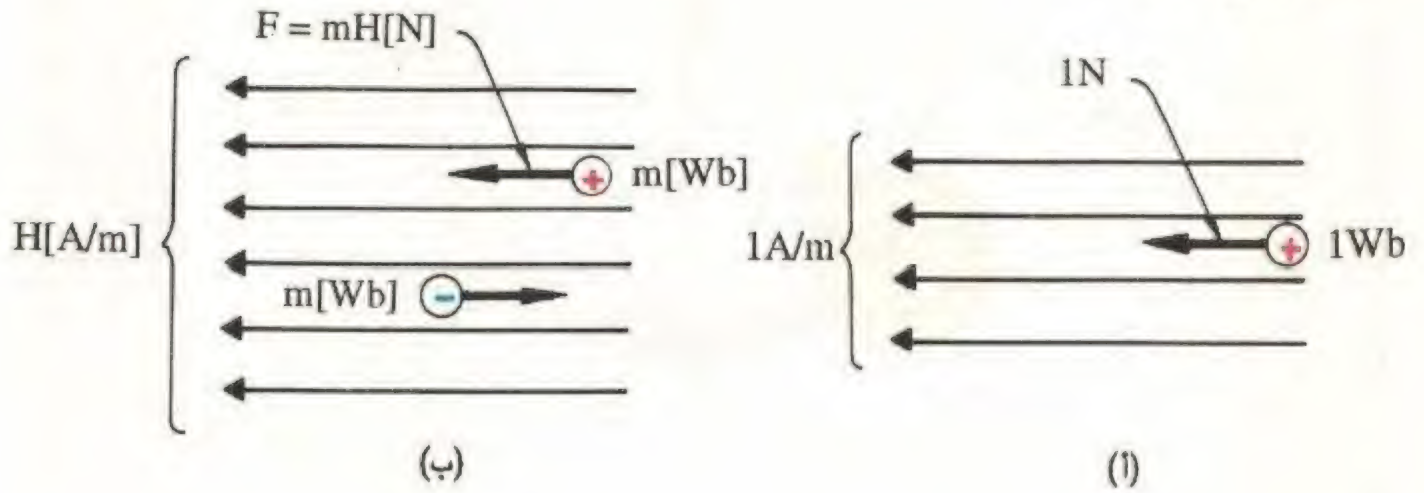
هناك فرق بين موقع القطب المغناطيسي الأرضي والقطب الجغرافي المجاور له ، ويختلف اتجاه الخطوط المغناطيسية المارة بالنقط المختلفة على سطح الأرض عن الاتجاهات إلى الأقطاب الجغرافية

وحدة قياس شدة المجال المغناطيسي هي أمبير / متر ، ويرمز لها بالرمز $[A/m]$.
والشدة 1 أمبير / متر هي شدة المجال المغناطيسي الذي إذا وضع فيه قطب مغناطيسي قوته 1 ويبر أثرت عليه قوة مغناطيسية قيمتها 1 نيوتن .

عند وضع قطب مغناطيسي قوته $m [Wb]$ في مجال مغناطيسي شدته $H[A/m]$ كما في الشكل ٢ - ٦ (ب) فإن القوة المغناطيسية $F [N]$ التي تؤثر على القطب يمكن حسابها من المعادلة التالية.

$$F = m H \quad [N] \quad (2-3)$$

وإتجاه هذه القوة المغناطيسية هو نفسه إتجاه المجال المغناطيسي إذا كان القطب المغناطيسي موجباً، ويكون إتجاهها معاكساً لإتجاه المجال المغناطيسي إذا كان القطب المغناطيسي سالباً .



الشكل ٢ - ٦ شدة المجال المغناطيسي

سؤال ٢

إذا كانت القوة المؤثرة على قطب مغناطيسي قوته 5×10^{-3} ويبر هي 3×10^{-2} نيوتن في الهواء . احسب شدة المجال المغناطيسي في هذه النقطة .

٢ - ١ - ٥ خطوط القوى المغناطيسية

لا ترى خطوط المجال المغناطيسي بالعين المجردة . ولكن مثلاً إذا قمنا برش بودرة الحديد حول قضيب مغناطيسي ؛ فإن بودرة الحديد تنتظم كما في الشكل ٢-٧ .

* شدة المجال المغناطيسي هي كمية متجهة لها قيمة واتجاه . ومع ذلك فإن قيمة شدة المجال المغناطيسي يطلق عليها عادة الشدة . وسوف نتبع هذا في النص .

** استخدام $[A/ m]$ ، أي التيار لكل 1 متر كوحدة قياس المجال المغناطيسي هي تعميم للحقيقة القائلة إن شدة المجال المغناطيسي الناتج من التيار الكهربائي يتناسب مع التيار .

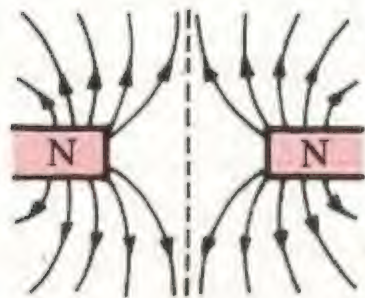
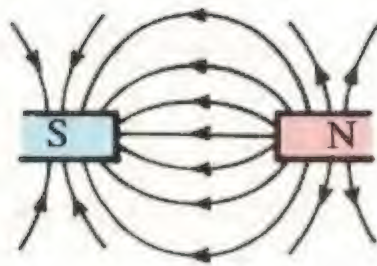
وتخيل شكل المنحنى المشابه للخط المرسوم بواسطة بودرة الحديد يساعدنا في التعرف على شكل خطوط المجال المغناطيسي . وهذا المنحنى التخيلي يسمى خط القوة المغناطيسية ، وله الخواص الآتية (انظر الشكل ٢ - ٨) :

- ١ - يخرج خط القوة المغناطيسية من قطب N للمغناطيس ، وينتهي عند قطب S .
- ٢ - خط القوة المغناطيسية يميل إلى الانكماش مثل الوتر المطاطي المشدود وله خاصية التناظر مع أي خط آخر في الاتجاه نفسه .
- ٣ - خطوط القوى المغناطيسية لا يعترض بعضها البعض ولا تتقاطع .
- ٤ - اتجاه خط المماس لخط القوى المغناطيسية عند أية نقطة هو اتجاه المجال المغناطيسي عند هذه النقطة .
- ٥ - كثافة خطوط القوى المغناطيسية في المستوى العمودي على المجال المغناطيسي تعبر عن شدة المجال المغناطيسي عند هذه النقطة .

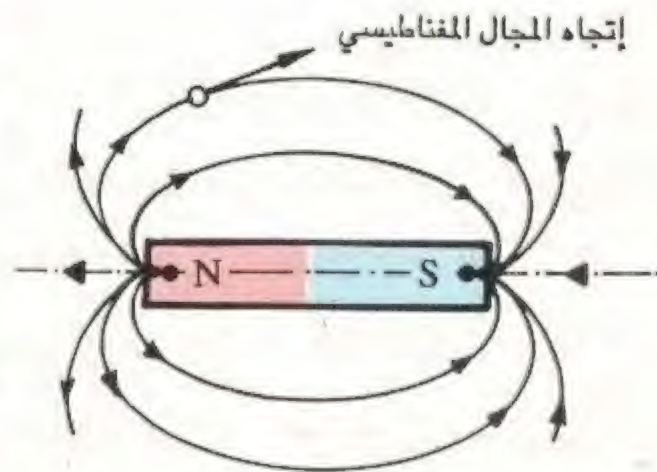
٦ - عند قطب مغناطيسي قوته الوحدة ($\pm 1 \text{ Wb}$) يكون عدد خطوط القوى المغناطيسية التي تخرج منه أو تدخل فيه يساوي ($1/\mu$) .



الشكل ٢ - ٧ المجال المغناطيسي لقضيب ممغنط



(ب)



(i)

الشكل ٢ - ٨ خطوط القوى المغناطيسية وتوزيعاتها

أندريه ماري أمبير

هو عالم فيزياء فرنسي فقد والده خلال الثورة الفرنسية، وعاش حياة غير سعيدة .
في عام ١٨١٩ أصبح أستاذاً في جامعة باريس .

في عام ١٨٢٠ نشر القانون المسمى بقانون أمبير الذي يعطي التأثير المتبادل بين
الموصلات التي يمر فيها تيار . وقام بشرح مغناطيسية المادة على أساس أن تأثير
المغناطيس يشبه تأثير التيار الكهربائي . وقد أسهمت أبحاثه في تأسيس القوانين
الأساسية للتيار الكهربائي والمغناطيسية

وحدة قياس التيار الكهربائي الأمبير، ورمزها [A] مشتقة من اسم عائلته .

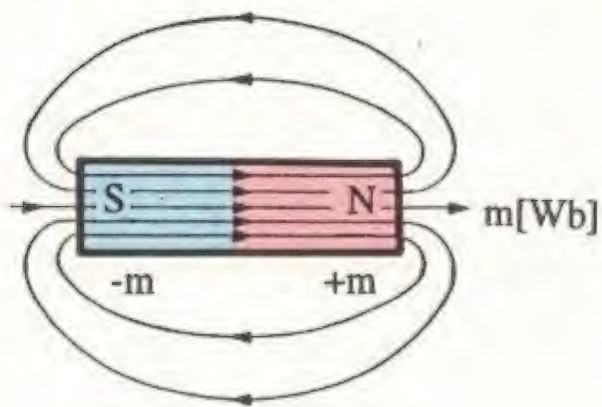
٢ - ١ - ٦ الفيض المغناطيسي والحاجب المغناطيسي

Magnetic flux and shield

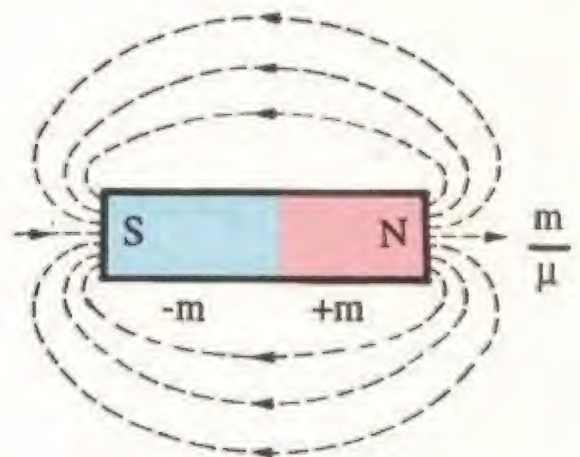
مع أن خط القوة المغناطيسي ملائم لشرح حالة المجال المغناطيسي إلا أنه لا يلائم قطب
مغناطيسي له قوة مغناطيسية ثابتة، وتتغير كمية خطوط القوة المغناطيسية تبعاً للوسط المحيط.
القطب المغناطيسي الذي شدته l ويبر يشع (l / μ_0) من خطوط القوى المغناطيسية في
الفراغ، ويشع $(l / \mu_0 \mu_r)$ من خطوط القوى المغناطيسية في وسط له نفاذية نسبية (μ_r)

وبصرف النظر عن نوع الوسط، فإنه يمكن تخيل أن الأقطاب المغناطيسية التي لها القوة
نفسها تشع عدد الخطوط المغناطيسية نفسه، وتسمى هذه الخطوط الفيض المغناطيسي.
ووحدة الفيض المغناطيسي هي الويبر [Wb] وهي نفس وحدة قوة القطب المغناطيسي .

كما هو مبين في الشكل ٢ - ٩ (ب) نجد قضيباً مغناطيسياً شدة كل من أقطابه
المغناطيسية m [Wb] إذن فهناك فيض مغناطيسي قيمته m [Wb] يخرج من قطب
(N) ويدخل في قطب (S) . أما في داخل المغناطيس فإن الفيض يسير من قطب (S)
إلى قطب (N) بصرف النظر عن الوسط الخارجي .



(ب) القطب المغناطيسي الذي قوته m (Wb) يخرج منه ويدخل فيه فيض مغناطيسي قيمته m (Wb)

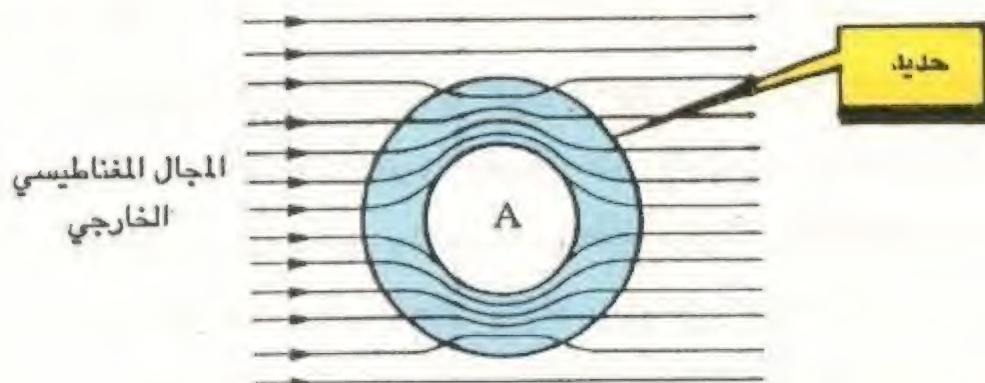


(أ) عدد خطوط القوى المغناطيسية يتغير طبقاً لنوع الوسط

الشكل ٢ - ٩ خطوط القوى المغناطيسية والفيض المغناطيسي

Lines of magnetic force and magnetic flux

الحاجب المغناطيسي يستخدم لوقاية مكان ما من تأثير المجال المغناطيسي الخارجى . والجدير بالذكر أنه لا توجد مادة معينة للوقاية الكاملة من الفيض المغناطيسي . فكما هو مبين في الشكل ٢ - ١٠ نجد أن إحاطة المكان المراد وقايته بمادة مثل الحديد يمر خلالها الفيض المغناطيسي بسهولة (أي لها نفاذية نسبية عالية) * تجعل جزءاً كبيراً من الفيض المغناطيسي الآتى من المجال المغناطيسي الخارجى يمر خلال الحديد دون أن يمر خلال جزء الفراغ الداخلى . وتستخدم هذه الطريقة بكثرة لوقاية الأبواب الكهربائية من المجال المغناطيسي الخارجى حتى لا يتأثر عملها به .



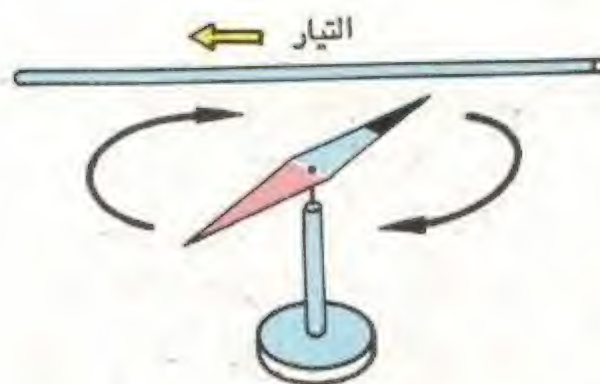
الشكل ٢ - ١٠ الحاجب المغناطيسي

* سوف نتناول النفاذية النسبية فيما بعد .

٢ - ٢ المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الكهربائي

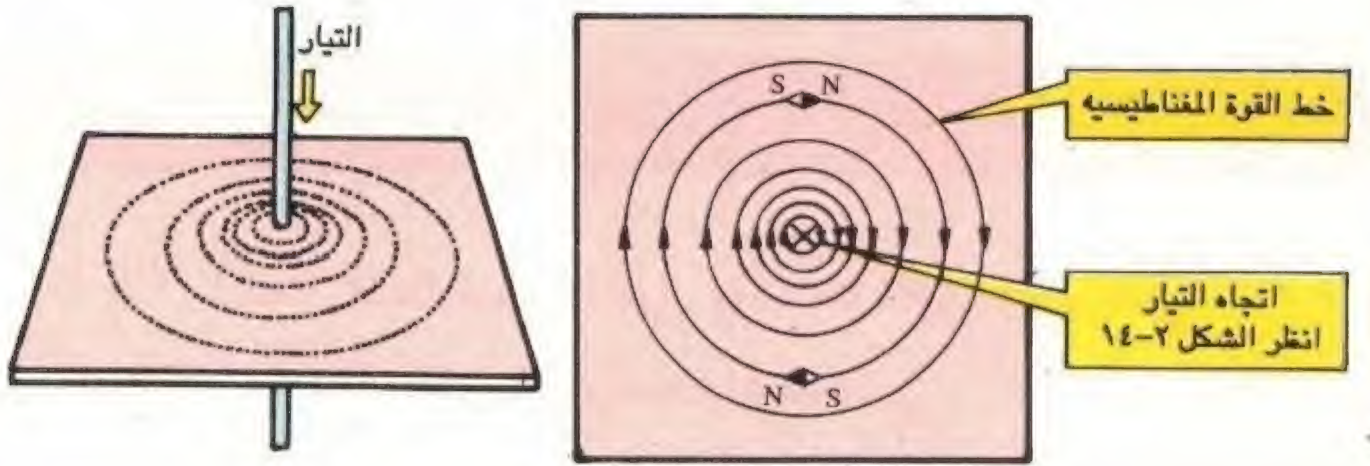
٢ - ٢ - ١ التيار الكهربائي والمجال المغناطيسي

كما في الشكل ٢ - ١١ عند وضع إبرة مغناطيسية بالقرب من سلك يمر به تيار فإنها تتأرجح مما يدل على وجود مجال مغناطيسي حول السلك .



الشكل ٢ - ١١ المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الكهربائي

ويلاحظ من الشكل ٢ - ١٢ (أ) أن التيار الكهربائي يمر في سلك رأسي من أعلى إلى أسفل ، وهذا السلك يخترق عمودياً لوحاً من الورق المقوى ، وعند رش بودرة الحديد على لوح الورق المقوى تظهر دوائر مركزية من بودرة الحديد حول السلك ومركزها هو السلك . وتزداد كثافة هذه الدوائر قريباً من السلك . وتعني هذه الظاهرة أن المجال المغناطيسي يتكون من دوائر مركزية مركزها هو السلك وأن المجال المغناطيسي أكثر شدة بالقرب من السلك . وإذا وضعنا إبرة مغناطيسية صغيرة في هذا المجال المغناطيسي فإنها تبين اتجاه المجال كما في الشكل ٢ - ١٢ (ب) .

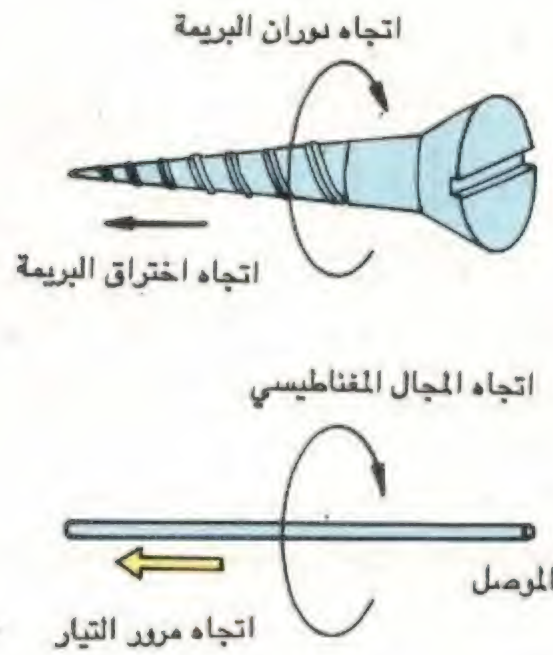


(أ) المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الكهربائي

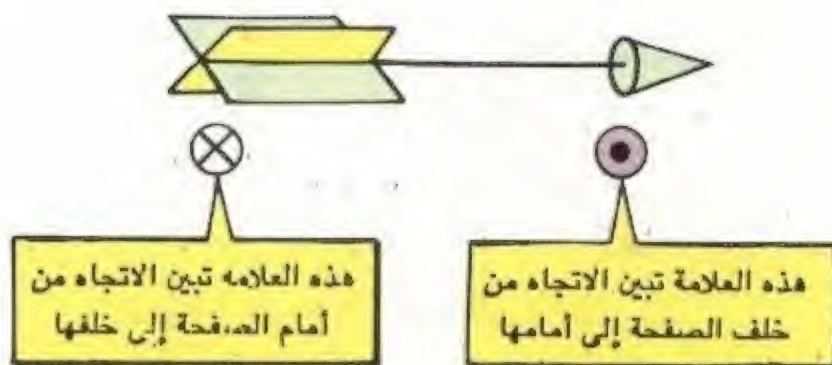
(ب) المظهر الأفقي للمجال المغناطيسي

الشكل ٢ - ١٢ اتجاه التيار الكهربائي والمجال المغناطيسي

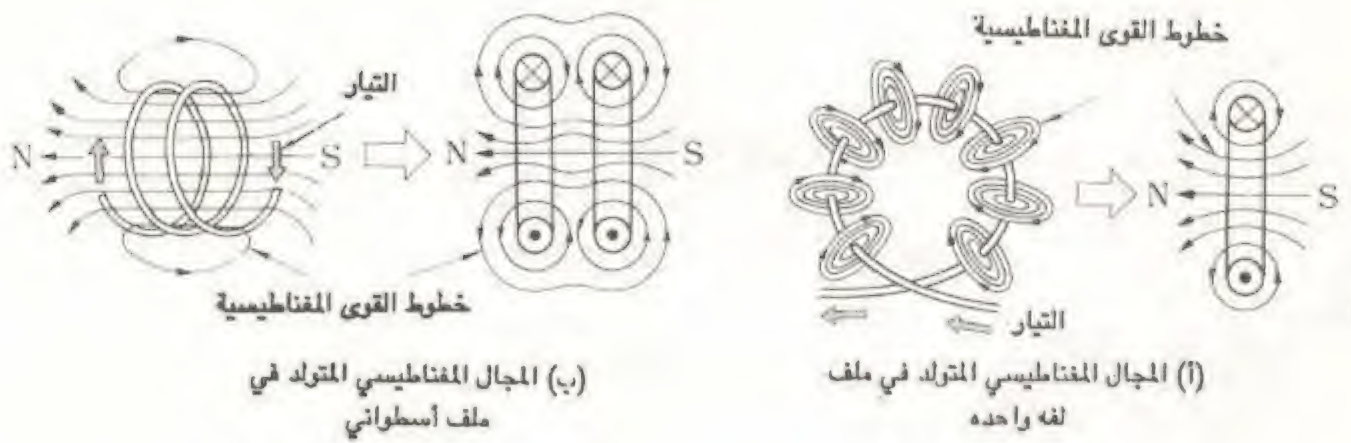
نتيجة لذلك عند إدارة بريمة اليد اليمنى بحيث تخترق في اتجاه التيار الكهربائي ؛ فإن اتجاه المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الكهربائي يكون هو نفسه اتجاه دوران البريمة وهذه هي قاعدة بريمة اليد اليمنى لأمبير . ويبين الشكل ٢ - ١٣ هذه العلاقات .



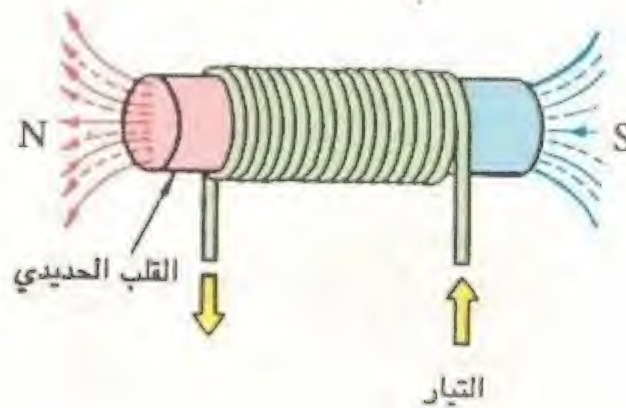
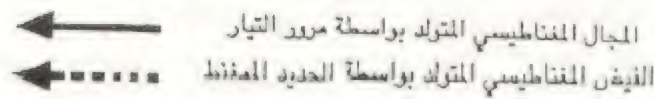
الشكل ٢ - ١٣ قاعدة بريمة اليد اليمنى لأمبير .



الشكل ٢ - ١٤ طريقة توضيح الاتجاه .



الشكل ٢ - ١٥ المجال المغناطيسي المتولد بواسطة مرور تيار في ملف .



الشكل ٢ - ١٦ المغناطيس الكهربائي .

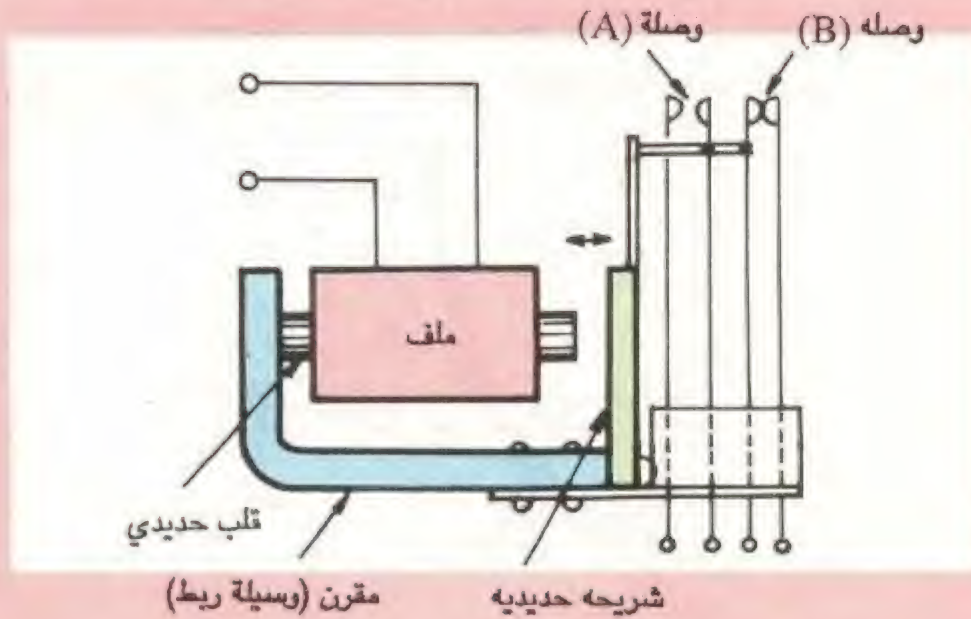
يمكن شرح المجال المغناطيسي المتولد بواسطة مرور تيار في ملف كما يلي : عند مرور التيار في ملف مكون من سلك ملفوف لفة واحدة؛ فإن المجال المغناطيسي يحدث كما في الشكل ٢ - ١٥ (أ) . ويوضح الشكل ٢ - ١٥ (ب) أنه عند مرور التيار في الملف

الاسطوانى يتولد المجال المغناطيسى باتجاه ثابت وشدة ثابتة داخل الملف، ويكون له قطبان مغناطيسىان (N) ، (S) عند نهايتي الملف تماماً كما في القضيب الممغنط . وهذا المغناطيس الناتج عن مرور التيار الكهربائي يسمى المغناطيس الكهربائي المبين بالشكل ٢ - ١٦ . في الاستخدام الفعلي في الأدوات الكهربائية يتم وضع قلب حديدي داخل الملف الأسطوانى للحصول على مغناطيس أقوى (الملف الأسطوانى هو سلك ملفوف حلزونياً) ..

المرحل الكهرومغناطيسى Electromagnetic relay

المرحل الكهرومغناطيسى هو أداة تستخدم المغناطيس الكهربائي بغرض فتح وقفل النواثر الكهربائية . وهناك أحجام مختلفة للمرحل الكهرومغناطيسى للاستخدامات المختلفة التى تتراوح بين استخدامات القدرة واستخدامات التحكم .

يبين الشكل ٢ - ١٧ مبدأ عمل المرحل الكهرومغناطيسى . عند مرور التيار في الملف يجذب القلب الحديدي الشريحة الحديدية لتغلق أو تفتح الوصلة . وبصفة عامة يوجد وصلة (A) تغلق عند مرور التيار في الملف، ووصلة أخرى (B) تفتح عند مرور التيار . والملف الواحد يكون له عدة وصلات للفتح والغلق في الوقت نفسه .



الشكل ٢ - ١٧ مبدأ عمل المرحل الكهرومغناطيسى

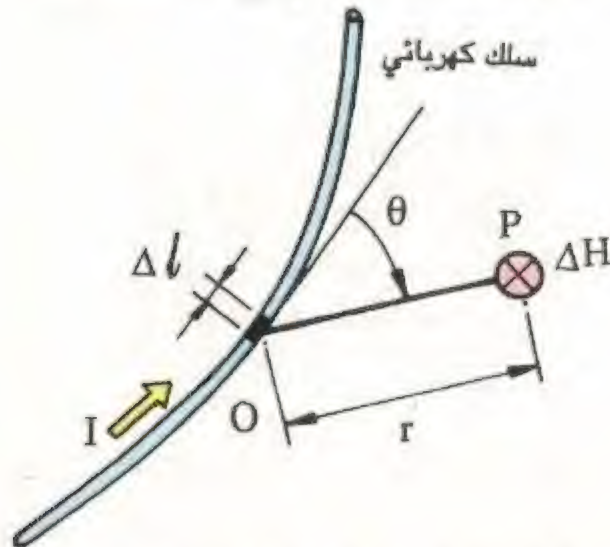
٢ - ٢ - ٢ حساب المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الكهربائي
يمكن حساب شدة المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الكهربائي باستخدام قاعدة
بيوت سافارت وقانون المسار المغلق لأمبير .

١ - قانون بيوت سافارت Biot - Savart's law

كما في الشكل ١٨ - ٢ عند مرور التيار في السلك يتولد مجال مغناطيسي حول التيار .
إذا كانت الزاوية بين خط المماس (Δl) والخط (OP) هي (θ) ، فإن شدة المجال
المغناطيسي ΔH [A/m] عند النقطة P التي تبعد مسافة r [m] من النقطة (O)
الناشئ عند مرور التيار I [A] في طول صغير من السلك Δl [m] يمكن حسابه من
المعادلة :

$$\Delta H = \frac{I \Delta l}{4 \pi r^2} \sin \theta \quad [A/m] \quad (2-4)$$

وتسمى هذه العلاقة قانون بيوت سافارت . واتجاه المجال المغناطيسي هنا يتبع قاعدة بريمة
اليد اليمنى، ويكون عمودياً على الصفحة كما في الشكل ١٨ - ٢ .



الشكل ١٨ - ٢ قانون بيوت سافارت

في المعادلة (4 - 2) ، ΔH هي شدة المجال المغناطيسي الناشئ عن الجزء الضئيل جداً (Δl) وشدة المجال المغناطيسي عند النقطة P هي مجموع التأثيرات الناشئة عن السلك بأكمله .

ب - المجال المغناطيسي لملف أسطواناني Cylindrical coil

عندما يمر التيار I [A] في ملف أسطواناني نصف قطره r [m] ، كما في الشكل ١٩-٢ يمكن حساب شدة المجال المغناطيسي H [A/m] عند مركز الملف P كما يلي: نفترض أنه تم تقسيم الملف إلى (n) من الأقسام أطواله (Δl_1) ، (Δl_2) ، ، (Δl_n) . نفترض أيضاً أن شدة المجال المغناطيسي عند المركز P الناشئ عن مرور التيار في هذه الأقسام هي (ΔH_1) ، (ΔH_2) ، ... ، (ΔH_n) طبقاً لقانون بيوت سافارت .

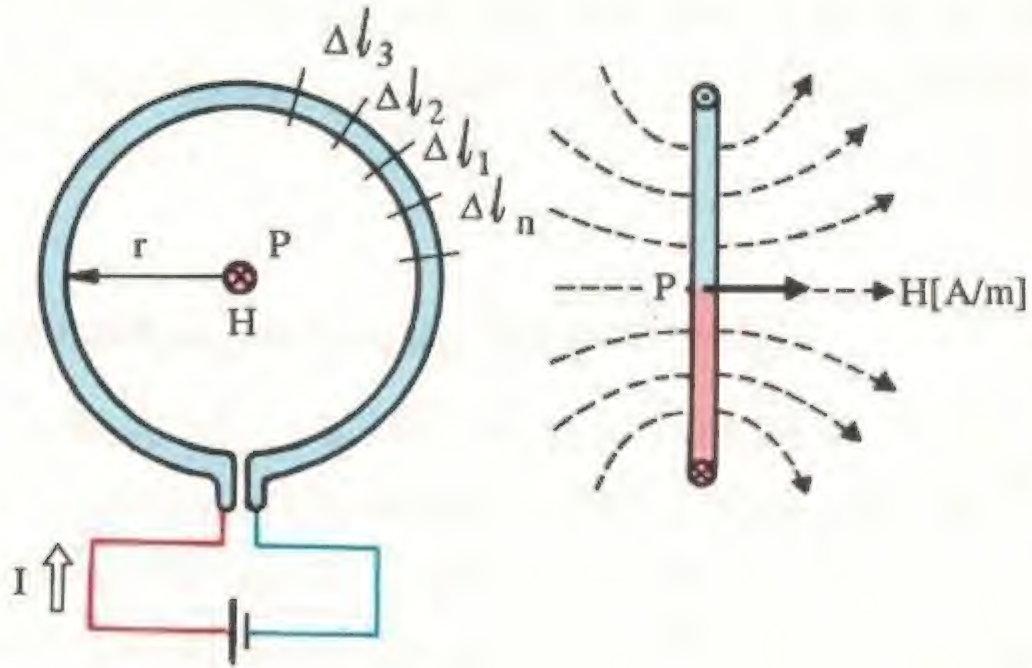
المسافة بين كل من هذه الأجزاء الصغيرة جداً وبين المركز P هي r [m] ، والزاوية θ تساوى 90 درجة لجميع هذه الأجزاء . أي إن $\sin \theta = \sin 90^\circ = 1$ من المعادلة (4 - 2) ينتج أن :

$$\Delta H_1 = \frac{I \Delta l_1}{4 \pi r^2} , \Delta H_2 = \frac{I \Delta l_2}{4 \pi r^2} , \dots , \Delta H_n = \frac{I \Delta l_n}{4 \pi r^2}$$

طبقاً لقاعدة بريمة اليد اليمنى تكون اتجاهات المجال المغناطيسي عند النقطة P متطابقة . وبجميع هذه القيم نحصل على شدة المجال المغناطيسي الكلي H [A/m] كما يلي :

$$H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \dots + \Delta H_n$$

$$= \frac{I}{4 \pi r^2} (\Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_n)$$



الشكل ٢ - ١٩ المجال المغناطيسي لملف أسطواني

ومجموع الأطوال $(\Delta l_1), (\Delta l_2), \dots, (\Delta l_n)$ هو طول محيط الملف وهو يساوي $2\pi r$ [m]. وبالتعويض في المعادلة نحصل على :

$$H = \frac{I}{4\pi r^2} \times 2\pi r = \frac{I}{2r} \quad [\text{A/m}] \quad (2-5)$$

أما إذا كان عدد لفات الملف هو N ، فإن شدة المجال المغناطيسي تكون :

$$H = \frac{NI}{2r} \quad [\text{A/m}] \quad (2-6)$$

مثال ٢

يمر تيار قيمته 0.4 أمبير في ملف أسطوانى نصف قطره 10 سم ، ويتكون من 5 لفات . احسب شدة المجال المغناطيسى عند مركز الملف .

الحل

نقوم بالتعويض في المعادلة (6 - 2) كالآتى :

$$N = 5 , I = 0.4 \text{ A} , r = 0.1 \text{ m}$$

$$H = \frac{5 \times 0.4}{2 \times 0.1} = 10 \text{ A / m}$$

سؤال ٣

عند مرور تيار في ملف أسطوانى نصف قطره 20 سم، ومكون من 10 لفات نشأ مجال مغناطيسى كانت شدته عند مركز الملف 5 أمبير / متر . احسب قيمة التيار المار في الملف .

جـ - قانون المسار المغلق لأمبير

كما في الشكل ٢ - ٢٠ نجد مسار مغلق طوله (m) ℓ مكون من لفة واحدة تحيط بسلك يمر به تيار $I [A]$ ينتج عنه مجال مغناطيسى . نفترض أن المسار المغلق تم تقسيمه إلى عدد (n) من الأقسام الصغيرة طولها $\Delta \ell_1 [m]$, $\Delta \ell_2 [m]$, ..., $\Delta \ell_n [m]$ وشدة المجال المغناطيسى عند هذه الأقسام هي :

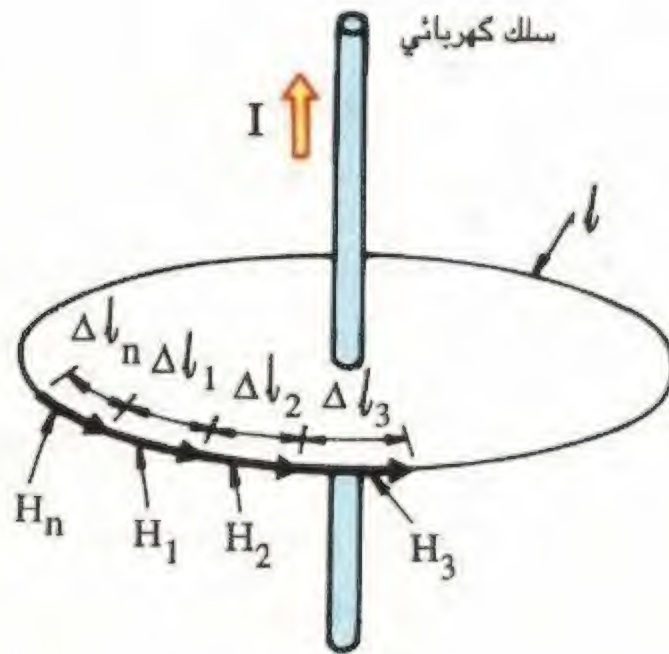
$$H_1 [A/m] , H_2 [A/m] , \dots , H_n [A/m]$$

إذن العلاقة بين المجال المغناطيسي والتيار الكهربائي تكون كالتالي :

$$H_1 \Delta l_1 + H_2 \Delta l_2 + \dots + H_n \Delta l_n = \sum_{k=1}^n H_k \Delta l_k = I \quad (2-7)$$

وتسمى هذه العلاقة بقانون المسار المغلق لأمبير.

العلاقة بين اتجاهات التيار والمجال المغناطيسي تتبع قاعدة اليد اليمنى . وعند تجميع الأجزاء المختلفة في المعادلة (2-7) يجب مراعاة اتجاه كل جزء . ويستخدم قانون بيوت ساڤارت لحساب شدة المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الكهربائي . ومع ذلك فإنه بالنسبة لحالة المجال المغناطيسي يمكن إجراء حسابات بسيطة باستخدام قانون المسار المغلق لأمبير .



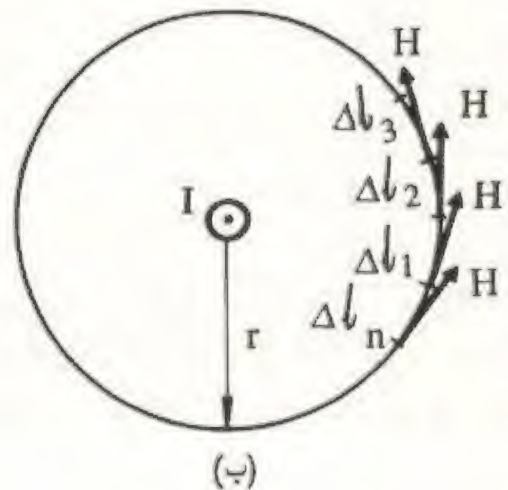
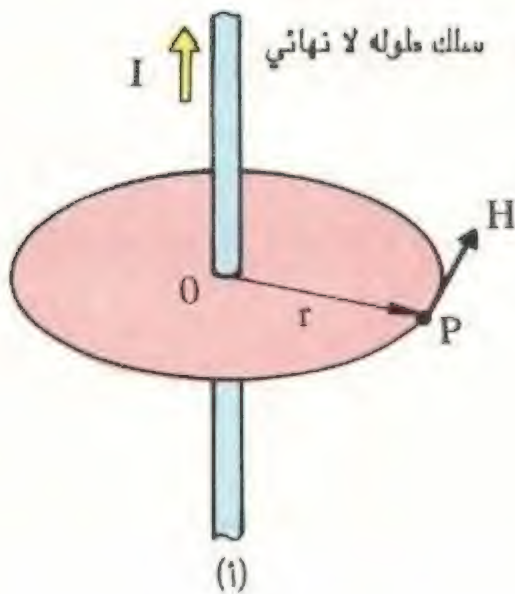
الشكل ٢ - ٢٠ قانون المسار المغلق لأمبير

د - المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار الكهربائي في سلك خط مستقيم

كما في الشكل ٢ - ٢١ (أ) يمكن حساب شدة المجال المغناطيسي H [A/m] عند نقطة P تبعد مسافة r [m] من سلك خطي طوله لانهائي يمر فيه تيار I [A] كما يلي :

يكون المجال المغناطيسي في صورة حلقات مركزية مركزها المشترك هو السلك؛ لأن السلك طوله لانهائي . وتتساوى قيمة شدة المجال المغناطيسي عند أية نقطة على محيط الدائرة التي نصف قطرها r [m] .

أما اتجاه المجال المغناطيسي فيكون هو اتجاه خط المماس عند محيط الدائرة . ويمكن تطبيق قانون المسار المغلق لأمبير على المسار المغلق المكون من لفة واحدة وتبعد كل نقطة على المحيط مسافة r [m] من السلك المركزي .



الشكل ٢ - ٢١' المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار الكهربائي في سلك خط مستقيم

يوضح الشكل ٢ - ٢١ (ب) أنه عند تقسيم محيط الدائرة إلى عدد (n) من الأقسام الصغيرة أطوالها $\Delta l_1, \Delta l_2, \dots, \Delta l_n$ وشدة المجال المغناطيسي عند كل منها هي H [A/m] . نحصل على المعادلة التالية :

$$H \Delta l_1 + H \Delta l_2 + \dots + H \Delta l_n = H (\Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_n) = I [A]$$

وحيث إن $\Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_n = 2\pi r$ إذن بالتعويض نجد أن :

$$H \times 2\pi r = I$$

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (A/m)$$

(2 - 8)

مثال ٣

سلك كهربائي على شكل خط مستقيم يمر به تيار قيمته 5 أمبير ، احسب شدة المجال المغناطيسي عند نقطة تبعد 20 سم من السلك .

الحل

نقوم بالتعويض في المعادلة (2 - 8) كالآتي :

$$I = 5 A, \quad r = 0.2 m$$

$$H = \frac{5}{2 \times 3.14 \times 0.2} = 3.98 \quad A/m$$

سؤال ٤

سلك كهربائي على شكل خط مستقيم يمر به تيار قيمته 1 أمبير ، احسب شدة المجال المغناطيسي عند نقطة تبعد 10 سم من السلك .

هـ - المجال المغناطيسي الناشئ عند مرور التيار في ملف أسطوانى

يبين الشكل ٢ - ٢٢ حساب شدة المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور التيار في ملف أسطوانى .

إذا افترضنا أن الملف الأسطوانى له طول لانهائى ؛ فإن المجال المغناطيسي داخل الملف يكون موازياً لمحور الملف الأسطوانى طبقاً لقاعدة اليد اليمنى ، وتكون شدة المجال المغناطيسي في الاتجاه العمودي على محور الملف مساوية للصفر .

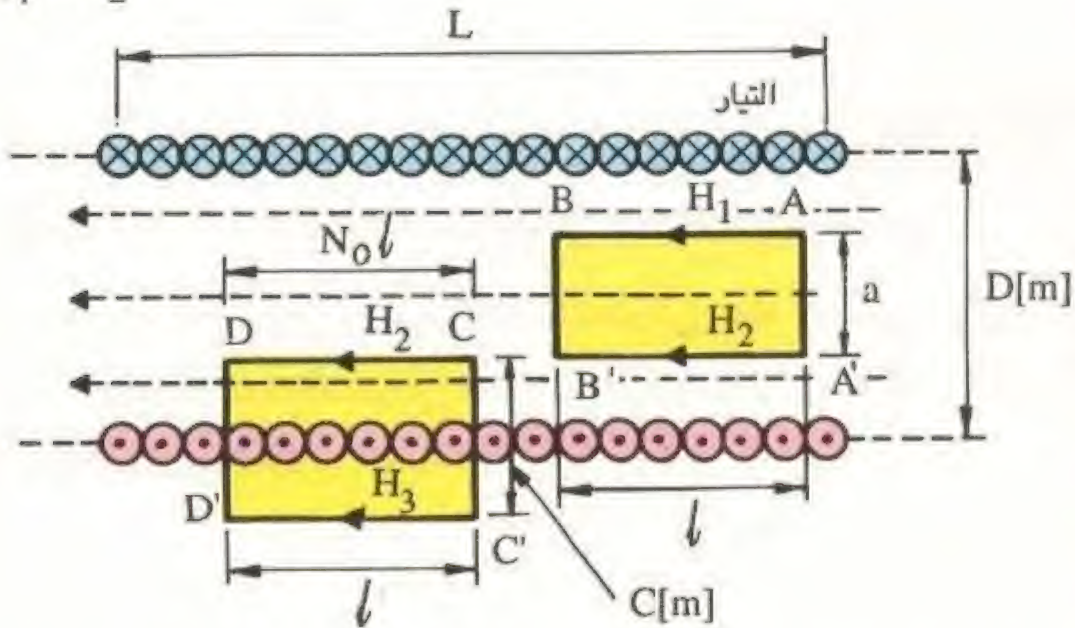
وإذا أخذنا المسار المستطيل المغلق $ABB'A'$ داخل الملف الأسطوانى ، فيمكن تطبيق قانون المسار المغلق لمبير . نفترض أن $AB = A'B' = l$ (m) وأن شدة المجال المغناطيسي في الجزء AB هي H_1 (A/m) وشدة المجال المغناطيسي في الجزء $A'B'$ هي H_2 (A/m) . ونفترض أن $AA' = BB' = a$ (m) فتكون شدة المجال المغناطيسي في هذين الجزأين مساوية للصفر . وحيث إنه لا يمر تيار في هذا

$$H_1 l + 0 \times a + (-H_2) l + 0 \times a = 0$$

المسار المغلق فإن :

$$H_1 = H_2$$

أي أن



الشكل ٢ - ٢٢ المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور التيار في ملف أسطوانى

المعادلة السابقة تعني أن المجال المغناطيسي داخل الملف الأسطواني له الشدة نفسها في أي مكان . ويمثل ذلك مجالاً مغناطيسياً منتظماً له اتجاه ثابت وقيمة ثابتة .

بالطريقة نفسها إذا أخذنا مساراً مغلقاً خارج الملف الأسطواني . وحيث إنه لا يمر تيار في ذلك المكان يكون المجال المغناطيسي خارج الملف الأسطواني منتظماً ، وعند نقطة تبعد بعداً لانهائياً من الملف الأسطواني تكون شدة المجال المغناطيسي صفراً ؛ فإن شدة المجال المغناطيسي خارج الملف الأسطواني تساوي صفراً في أي مكان .

بعد ذلك نأخذ المسار المغلق (CDD'C') الذي يحتوي على سطح الملف الأسطواني . وشدة المجال المغناطيسي الداخلي هي $H_1 = H_2 = H$ (A/m) في الجزء CD أما في باقي الأجزاء الداخلية في المجال المغناطيسي يساوي صفراً . نفترض أن $CD = C'D'$ $CC' = DD' = c$ (m) وأن $\ell = \angle$ (m) ونفترض أن التيار I (A) يمر في عدد $(N_0 \angle)$ من الموصلات في المسار المغلق .

وعلى ذلك يمكن استنتاج المعادلة الآتية :

$$H\ell + 0 \times C + 0 \times \angle + 0 \times C = N_0 \angle I$$

$$H\ell = N_0 \angle I$$

إذن

$$H = N_0 I \text{ (A/m)}$$

(2 - 9)

وتمثل المعادلة (2 - 9) شدة المجال المغناطيسي داخل الملف الأسطواني .

وحيث أنه في الواقع العملي لا يوجد ملف أسطواني طوله لانهائي . إذن يمكن تطبيق المعادلة (2 - 9) داخل الملف الأسطواني عندما يكون الطول الكلي للملف L (m) كبيراً بالنسبة إلى القطر D (m) .

مثال ٤

ملف اسطواناني رفيع يحتوى كل 1 سم طولي منه على 5 لفات يمر به تيار قيمته 3 أمبير . احسب شدة القوة المغناطيسية داخل الملف الأسطواناني .

الحل

نقوم بالتعويض في المعادلة (9 - 2) كالاتى :

$$N_O = 500 \text{ (/ m) } , I = 3 \text{ A}$$

فنحصل على

$$H = 500 \times 3 = 1500 \text{ A/m}$$

سؤال ٥

ملف أسطواناني عند مرور تيار قيمته 5 أمبير به تولد مجال مغناطيسي داخله شدته 2000 أمبير / متر ، احسب عدد لفات الملف لكل سم طولي .

و- المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور التيار في ملف حلقة

كما في الشكل ٢ - ٢٣ الملف الحلقة هو سلك ملفوف بطريقة منتظمة في شكل حلقة ، ويمكن حساب شدة المجال المغناطيسي داخل هذا الملف عند مرور التيار فيه .

يتتبع اتجاه المجال المغناطيسي داخل الملف كما هو مبين بالشكل . نفترض أن عدد اللفات الكلى هو (N) والتيار المار به هو (I (A) ومتوسط نصف قطر الحلقة هو (r (m) .
نستخدم قانون المسار المغلق لأمبير في حساب شدة المجال المغناطيسي (H (A/m) كما يلي :

$$H \times 2 \pi r = NI$$

وإذا فرضنا أن $2\pi r = \cancel{\quad}$ نحصل على المعادلة الآتية :

$$H = \frac{NI}{2 \pi r} = \frac{NI}{\cancel{\quad}} \quad (A/m) \quad (2 - 10)$$

من المعادلة (2 - 10) يظهر أن هناك فرقاً بين شدة المجال المغناطيسي داخل الحلقة عند النقط التي تبعد مسافة $r_1 (m)$ عن مركز الحلقة O والنقط التي تبعد مسافة $r_2 (m)$ عن مركز الحلقة . ومع ذلك فإنه إذا كان الفرق بين نصف القطر الخارجى ونصف القطر الداخلى صغيراً جداً بالنسبة لأي منهما ؛ فإن شدة المجال المغناطيسي الداخلى تكون تقريباً متساوية عند النقط المختلفة . ولهذا فإنه بوجه عام تعدّ قيمة المجال المغناطيسي عند محيط المقطع الدائري للملف مساوية لشدة المجال المغناطيسي الداخلى على أساس أنه مجال مغناطيسي منتظم .

مثال هـ

ملف على هيئة حلقة متوسط نصف قطره 10 سم وعدد اللفات الكلى به 100 ، مر به تيار فأحدث مجالاً مغناطيسياً داخلياً شدته 800 أمبير/ متر . احسب قيمة التيار .

الحل

نقوم بالتعويض في المعادلة (2 - 10) بالقيم الآتية :

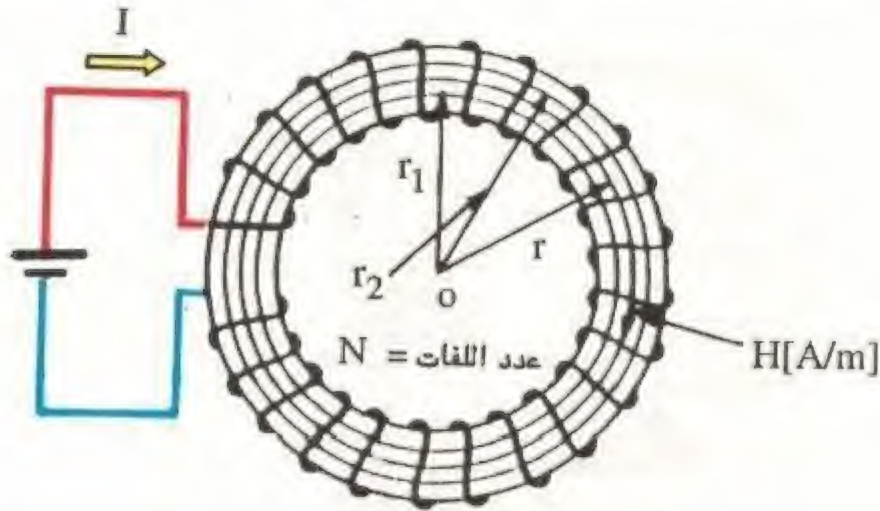
$$r = 0.1 \text{ m} , \quad N = 100 , \quad H = 800 \text{ A/m}$$

نحصل على

$$I = \frac{800 \times 2 \times 3.14 \times 0.1}{100} = 5 \text{ A}$$

سؤال ٦

في الشكل ٢ - ٢٣ إذا كان العدد الكلي لللفات $N = 500$ ، ومتوسط نصف قطر الحلقة* يساوي 20 سم ، وقيمة التيار تساوي 4 أمبير ، احسب شدة المجال المغناطيسي الداخلي للملف .



الشكل ٢ - ٢٣ المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور التيار في ملف حلقة

* لاحظ أن متوسط نصف قطر الحلقة هو المسافة بين مركز الحلقة O ومركز المقطع الدائري للملف الحلقة .

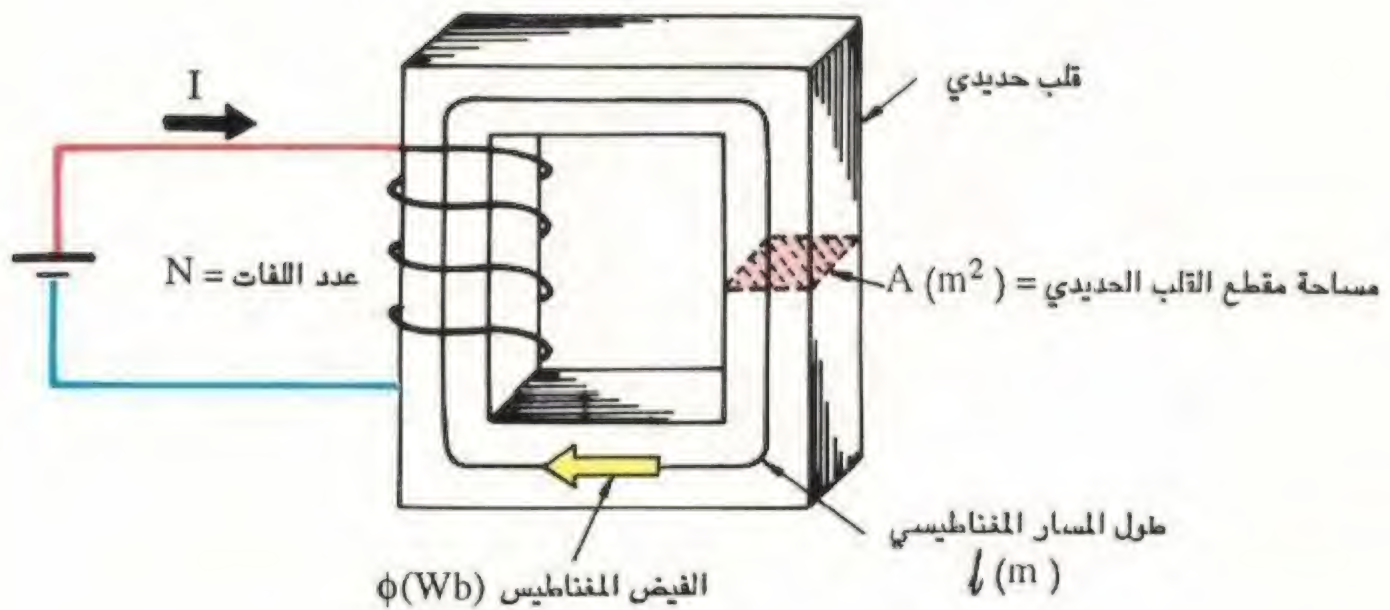
٢ - ٣ الدائرة المغناطيسية Magnetic Circuit

٢ - ٣ - ١ الدائرة المغناطيسية والمقاومة المغناطيسية

١- الدائرة المغناطيسية والقوة الدافعة المغناطيسية Magnetomotive force

كما في الشكل ٢ - ٢٤ عند مرور التيار الكهربائي $I [A]$ في الملف الملفوف حول

قلب حديدي يتولد فيض مغناطيس ϕ [Wb] في القلب الحديدي . ويزيد الفيض المغناطيسي ϕ بزيادة عدد لفات الملف (N) وبتزايد التيار I . أي إن الفيض المغناطيسي ϕ يتناسب مع حاصل الضرب (NI) عدد اللفات N في قيمة التيار I . وحاصل الضرب NI كمصدر للفيض المغناطيسي يعمل كقوة دافعة مغناطيسية وحدة قياسها الأمبير، ويرمز لها بالرمز [A]. ومسار الفيض المغناطيسي هو الدائرة المغناطيسية .



الشكل ٢ - ٢٤ الدائرة المغناطيسية

سؤال ٧

احسب القوة الدافعة المغناطيسية الناشئة من مرور تيار 0.2 أمبير في ملف به 500 لفة . ثم احسب التيار المطلوب لتوليد القوة الدافعة المغناطيسية نفسها في ملف به 50 لفة .

ب- المقاومة المغناطيسية والنفاذية Magnetic reluctance and permeability

كما في الشكل ٢ - ٢٤ تقوم القوة الدافعة المغناطيسية $NI [A]$ المؤثرة على دائرة مغناطيسية بتوليد فيض مغناطيسي $\phi [Wb]$ والنسبة بين القوة الدافعة المغناطيسية والفيض المغناطيسي تسمى الممانعة أو المقاومة المغناطيسية للدائرة المغناطيسية، وتعتبر عن صعوبة مرور الفيض المغناطيسي ضد القوة الدافعة المغناطيسية. وهذه العلاقة تناظر النسبة بين القوة الدافعة الكهربائية والتيار في الدائرة الكهربائية أى المقاومة الكهربائية.

وتعتبر المعادلة الآتية عن المقاومة المغناطيسية (R_m) وحدة قياسها هي مقلوب الهنري ويرمز لها بالرمز $[H^{-1}]$.

$$R_m = \frac{NI}{\phi} \quad [H^{-1}] \quad (2-11)$$

في الدائرة المغناطيسية يسهل مرور الفيض المغناطيسي $\phi [Wb]$ فى قلب حديدى ذي مساحة مقطع كبيرة $A [m^2]$ ، ويصعب مروره في مسار مغناطيسى طوله $[m]$ كبير، ولهذا يمكن التعبير عن المقاومة المغناطيسية كما يلى :

$$R_m = \frac{1}{\mu} \frac{l}{A} \quad [H^{-1}] \quad (2-12)$$

تعتمد قيمة النفاذية (μ) على المادة المكونة للمسار المغناطيسي. ووحدة قياس النفاذية هي هنرى/ متر، ويرمز لها بالرمز $[H / m]$ كما يتضح من المعادلة (2-12). والنفاذية النسبية هي النسبة (μ/μ_0) بين نفاذية المادة (μ) ونفاذية الفراغ (μ_0). والعلاقة الآتية تعبر عن النفاذية النسبية (μ_r).

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad [H / m] \quad (2-13)$$

النفاذية النسبية μ_r هي قيمة مهمة تعبر عن الخواص المغناطيسية للمادة، وتوجد عدة أمثلة لها في الجدول ١ - ٢

النفاذية النسبية μ_r	المادة	النفاذية النسبية μ_r	المادة
1.000179	الأكسجين	0.9999736	الفضة
1.000214	الألمنيوم	0.9999906	النحاس
10^3	لوح من الصلب السيليكوني	0.9999912	الماء
10^4	سبيكة عالية النفاذية المغناطيسية	1.000000365	الهواء

الجدول ١ - ٢ النفاذية النسبية μ_r .

في الجدول ١ - ٢ المادة الحديدية المغناطيسية هي مادة لها نفاذية نسبية كبيرة جداً ($\mu_r \gg 1$) مثل صلب السيليكون الذي يستخدم عادة للدوائر المغناطيسية، والمادة التي تكون نفاذيتها النسبية أكبر من الواحد ($\mu_r > 1$) تسمى مادة بارامغناطيسية. أما المادة التي تكون نفاذيتها النسبية أقل من الواحد ($\mu_r < 1$) فتسمى مادة ديامغناطيسية.

الدائرة المغناطيسية	الدائرة الكهربائية
القوة المغناطيسية	$E [V]$
$NI [A]$	القوة الدافعة الكهربائية
الفيض المغناطيسي	$I [A]$
$\phi [Wb]$	التيار
الممانعة المغناطيسية	$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{A} [\Omega]$
$R_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{A} [H^{-1}]$	المقاومة الكهربائية
النفاذية	$\sigma [S/m]$
$\mu [H/m]$	الموصلية

الجدول ٢ - ٢ التناظر بين الدوائر المغناطيسية والكهربائية

يبين الجدول ٢ - ٢ علاقات التناظر بين دائرة مغناطيسية ودائرة كهربائية . وعن طريق هذه العلاقات يمكن تطبيق قانون أوم وقانون كيرشوف المستخدمين في الدائرة الكهربائية ، على الدائرة المغناطيسية .

مثال ٦

في الدائرة المغناطيسية في الشكل ٢ - ٢٥ تؤثر قوة دافعة مغناطيسية (NI) قيمتها 200 أمبير على قلب حديدي مساحة مقطعه (A) تساوي 3 سم^٢ ، وطول المسار المغناطيسي (l) له هو 50 سم ، والنفاذية النسبية (μ_r) هي 1000 . احسب الفيض المغناطيسي $\phi [Wb]$. واحسب الفيض المغناطيسي في قلب حديدي به فجوة طولها $(\frac{l}{2})$ يساوي 1 مم .

الحل

نفترض أن $R_{mi} [H^{-1}]$ هي المقاومة المغناطيسية للقلب الحديدي، وأن

$R_{mg} [H^{-1}]$ هي المقاومة المغناطيسية للفجوة

يمكن حساب المقاومة المغناطيسية بدون الفجوة كالآتي :

$$R_{mi} = \frac{l}{\mu_o \mu_r} \times \frac{1}{A} = \frac{1}{4 \pi \times 10^{-7} \times 1000} \times \frac{50 \times 10^{-2}}{3 \times 10^{-4}} = 1.33 \times 10^6 \quad H^{-1}$$

$$\phi = \frac{NI}{R_{mi}} = \frac{200}{1.33 \times 10^6} = 150.4 \times 10^{-6} \quad \text{Wb}$$

ويمكن حساب المقاومة المغناطيسية مع وجود الفجوة كالآتي :

$$R_{mi} = \frac{1}{4 \pi \times 10^{-7} \times 1000} \times \frac{49.9 \times 10^{-2}}{3 \times 10^{-4}} = 1.32 \times 10^6 \quad H^{-1}$$

$$R_{mg} = \frac{1}{4 \pi \times 10^{-7}} \times \frac{0.1 \times 10^{-2}}{3 \times 10^{-4}} = 2.65 \times 10^6 \quad H^{-1}$$

$$\phi = \frac{NI}{R_{mi} + R_{mg}} = \frac{200}{(1.32 + 2.65) \times 10^6} = 50.4 \times 10^{-6} \quad \text{Wb}$$

يتضح من مثال ٦ أن وجود فجوة في القلب الحديدي يؤدي إلى إنقاص الفيض

المغناطيسي بصورة كبيرة ؛ ولهذا فإنه للحصول على فيض مغناطيسي كبير يجب

تحاشي وجود فجوة في القلب الحديدي .

سؤال ٨

دائرة مغناطيسية ذات فيض مغناطيسي متولد [Wb] مقداره 0.1×10^{-3} من القوة الدافعة المغناطيسية 150 A. احسب قيمة المقاومة المغناطيسية لهذه الدائرة.

سؤال ٩

قلب حديدي مساحة مقطعه (A) تساوى 5 سم^٢ وطول المسار المغناطيسي (ℓ) يساوي 1 متر والمقاومة المغناطيسية (R_m) تساوى 1×10^6 هنرى^{-١}. احسب النفاذية (μ).

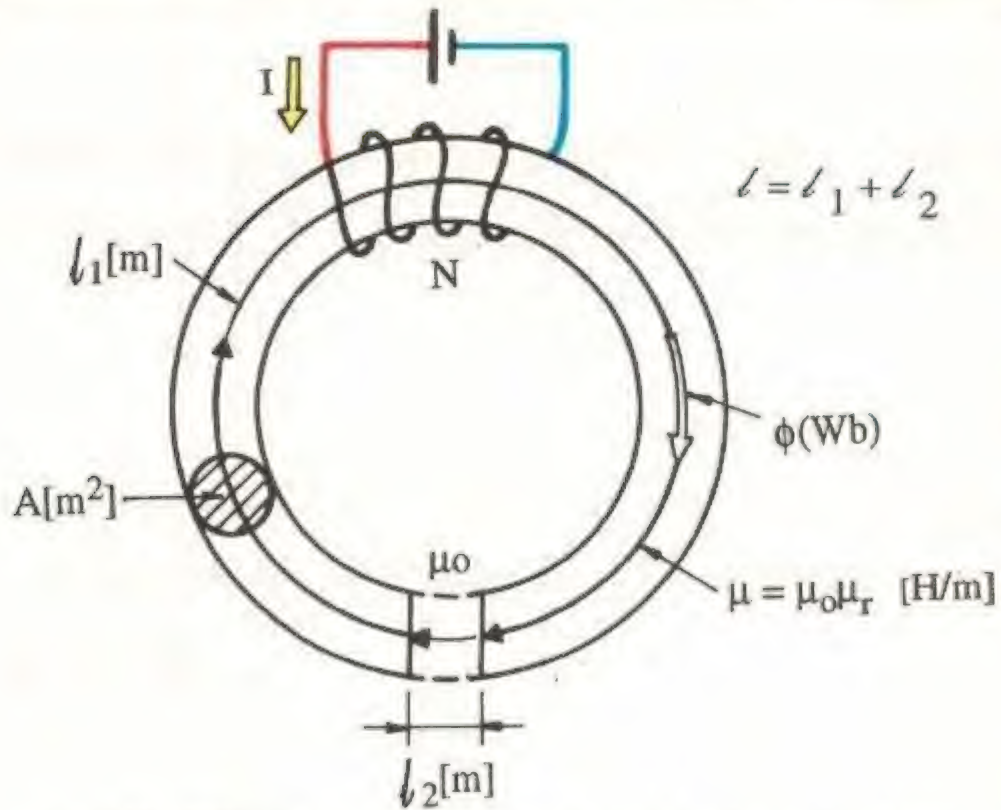
٢ - ٣ - ٢ كثافة الفيض المغناطيسي وشدة المجال المغناطيسي

Magnetic Flux Density and Magnetic Field Intensity

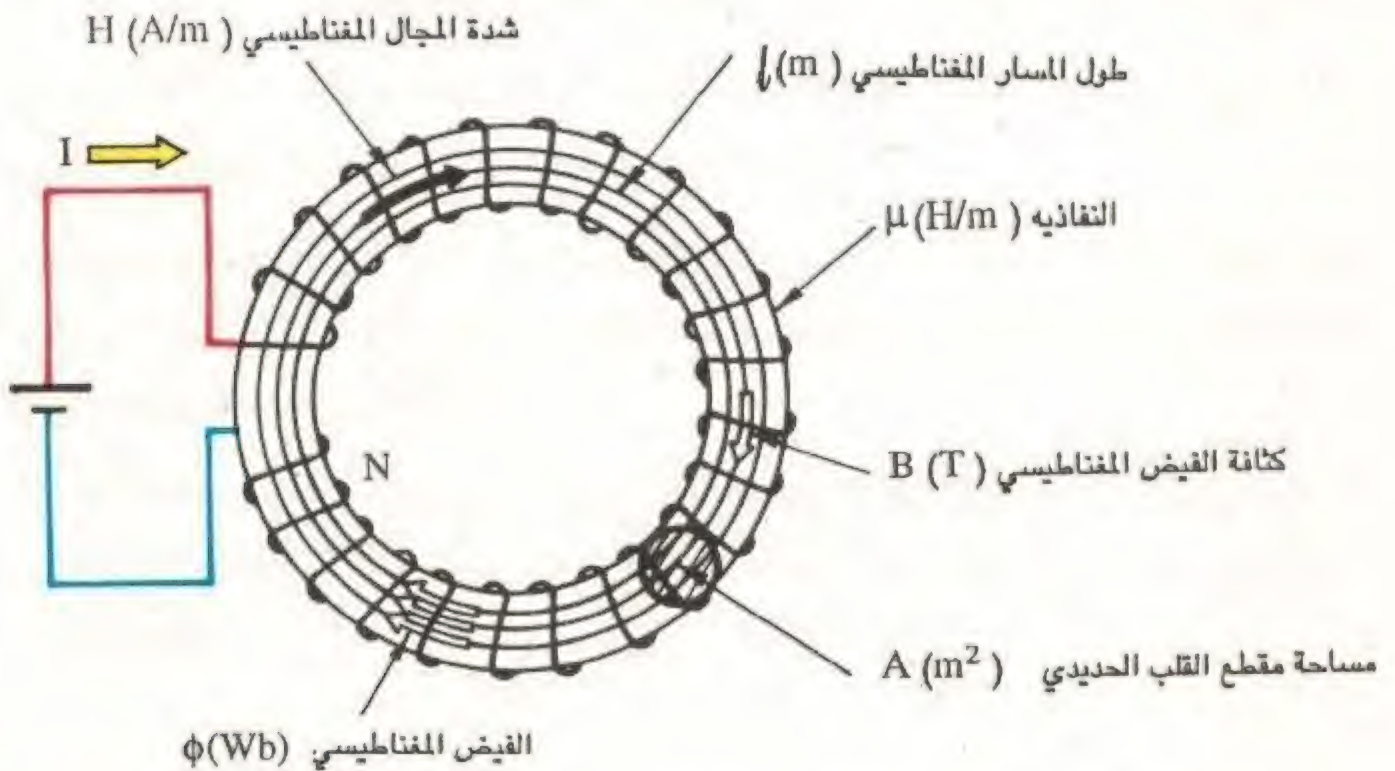
في هذا الجزء سنقوم بتحليل ظاهرة تمغنط المواد المغناطيسية مثل الحديد، والتي تستخدم بكثرة في الأنوات الكهربائية مثل المحولات والمحركات .

يوضح الشكل ٢ - ٢٦ أنه عند مرور التيار [A] I في ملف عدد لفاته N يحيط بقلب حديدي مساحة مقطعه [m²] A وطول المسار المغناطيسي [m] ℓ والنفاذية [H/m] μ ينشأ مجال مغناطيسي ϕ { Wb } .

كثافة الفيض المغناطيسي هي الفيض المغناطيسي الموجود في مساحة 1 متر مربع من مقطع القلب الحديدي ، ويرمز لها بالرمز B ووحدة قياسها (تسلا) ويرمز لها بالرمز [T] أو [Wb/m²] .



الشكل ٢ - ٢٥ دائرة مغناطيسية بها فجوة في القلب الحديدي



الشكل ٢ - ٢٦ كثافة الفيض المغناطيسي وشدة المجال المغناطيسي

فى الشكل ٢ - ٢٦ يمكن استنتاج المقاومة المغناطيسية R_m من المعادلة (2-11) والمعادلة (2-12) كما يلى :

$$R_m = \frac{N I}{\phi} = \frac{l}{\mu A}$$

من هذه المعادلة نحصل على :

$$\frac{N I}{l} = \frac{\phi}{\mu A} \quad (2-14)$$

الطرف الأيسر من العلاقة (2-14) يعبر عن القوة الدافعة المغناطيسية لكل 1 متر من الملف ويناظر شدة المجال المغناطيسي $H [A/m]$ داخل المسار المغناطيسي كما هو معلوم من المعادلة (9 - 2) . فى الطرف الأيمن الكمية (ϕ / A) هي كثافة الفيض المغناطيسي $B [T]$ ويمكن التعبير عن المعادلة (2-14) بالعلاقة الآتية :

$$H = \frac{N I}{l} = \frac{B}{\mu} \quad [A/m] \quad (2-15)$$

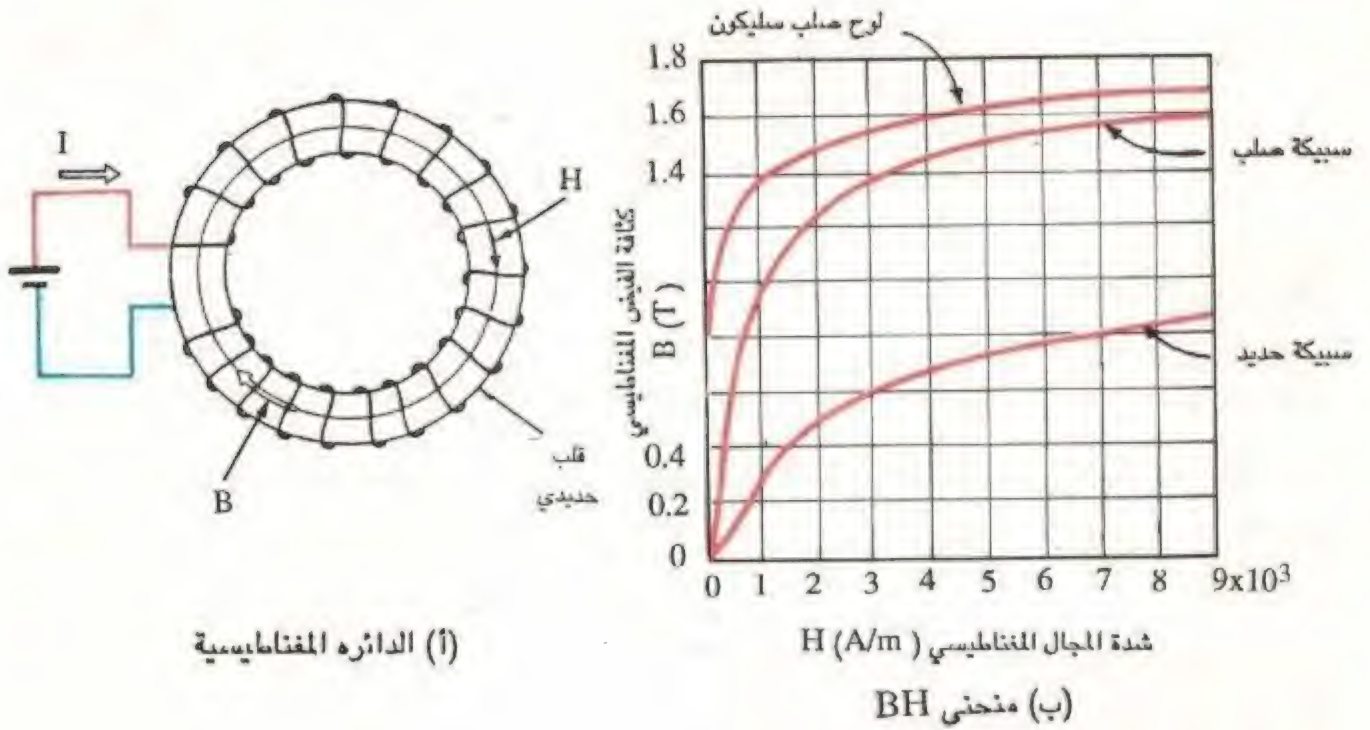
$$B = \mu H \quad [T] \quad (2-16)$$

٢ - ٣ - ٣ منحنى المغنطة والنفاذية

Magnetization curve and permeability

توجد علاقة بين كثافة الفيض المغناطيسي (B) وشدة المجال المغناطيسي (H) ، هي $(B=\mu H)$ فى الفراغ وفى الهواء تكون قيمة النفاذية (μ) ثابتة، ولهذا فإن العلاقة بين H ، B تكون علاقة خط مستقيم . أما فى المواد المغناطيسية فإن النفاذية (μ) تتغير وتكون العلاقة بين H ، B غير خطية .

عند الزيادة التدريجية للتيار المار فى ملف ملفوف حول قلب حديدى لم تسبق مغنطته إطلاقاً كما فى الشكل ٢ - ٢٧ (أ) ، يزيد الفيض المغناطيسي فى القلب الحديدي بالتدرج . والعلاقة بين شدة المجال المغناطيسي $H [A/m]$ وكثافة الفيض المغناطيسي $B [T]$ تبينها منحنيات الشكل ٢ - ٢٧ (ب) . هذه المنحنيات تسمى منحنى BH أو منحنى المغنطة.



الشكل ٢ - ٢٧ منحنى BH للحديد

وبوجه عام فإن منحنى BH منحنى غير خطي، وله خاصية التشبع عند زيادة شدة المجال المغناطيسي H. وهذه الخاصية تسمى بالتشبع المغناطيسي.

النفاذية ($\mu = B / H$) هي قيمة غير ثابتة، وتتغير مع تغير شدة المجال المغناطيسي، ولهذا فإن العلاقة بين B, H تصبح علاقة غير خطية.

يبين الشكل ٢ - ٢٧ (ب) منحنيات BH لعدد من المواد التي تستخدم عادة كقلب حديدي في الأدوات الكهربائية. ومن هذه المواد صلب السيليكون وسبيكة الحديد.

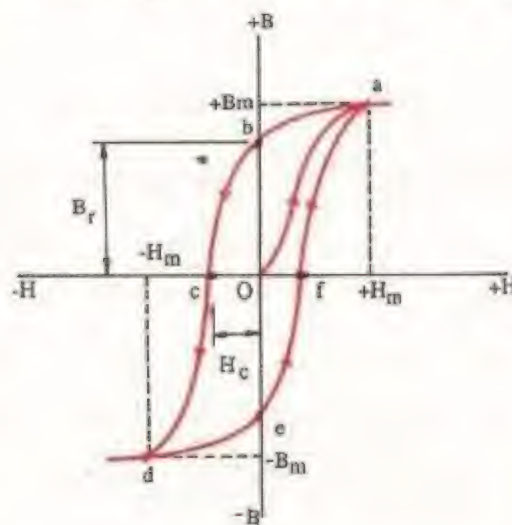
شدة المجال المغناطيسي (H) هي كثافة خطوط القوى المغناطيسية؛ والنفاذية (μ) هي النسبة بين كثافة الفيض المغناطيسي وكثافة خطوط القوى المغناطيسية طبقاً للعلاقة

(2-16) . ولهذا فإن عددا قدره (B) من الفيض المغناطيسي يناظر عددا قدره (B / μ)

من خطوط القوى المغناطيسية ، وهذا ينطبق مع نتيجة الشكل ٢ - ٩ .

٢ - ٣ - ٤ حلقة التخلف المغناطيسي (الهستيريسيس) Hysteresis loop

في الجزء التالي سوف نلقى مزيد من الضوء على ظاهرة مغنطة المواد المغناطيسية مثل الحديد. في الشكل ٢ - ٢٨ نجد أنه عند زيادة شدة المجال المغناطيسي (H) من النقطة O إلى (+H_m) تتغير كثافة الفيض المغناطيسي (B) من النقطة O إلى النقطة (a) ، عند إنقاص شدة المجال المغناطيسي (H) من (+H_m) إلى الصفر تتغير كثافة الفيض المغناطيسي (B) من النقطة a إلى النقطة b حيث كثافة الفيض المغناطيسي تساوى B_r وهى قيمة لا تساوى صفراً برغم أن شدة المجال المغناطيسي تساوى صفراً . وهذه هي الفيض المغناطيسي المتبقي . والآن عند تغيير شدة المجال المغناطيسي من الصفر إلى القيمة السالبة (H_c) تقل كثافة الفيض المغناطيسي من B_r إلى الصفر . وشدة المجال المغناطيسي H_c التى تكون عندها كثافة الفيض المغناطيسي صفراً تسمى القوة الجبرية . وبتغيير H من القيمة H_c إلى H_m تتغير كثافة الفيض المغناطيسي من صفر إلى (-B_m) . والآن عند زيادة شدة المجال المغناطيسي من (-H_m) إلى (+H_m) يمر المنحنى بالنقط (d) ثم (e) ثم (f) ثم (a) لنحصل على حلقة مغلقة .



الشكل ٢ - ٢٨ خواص التخلف المغناطيسي

هذه الظاهرة تسمى خاصية التخلف المغناطيسي، والمنحنى المغلق الذي يبين هذه الخاصية المميزة يسمى حلقة الهستيريسيس .

ويستهلك الدوران في حلقة التخلف المغناطيسي طاقة تتناسب مع المساحة المحاطة بهذه الحلقة . وهذه الطاقة تسمى فقد التخلف المغناطيسي . عند مغنطة القلب الحديدي باستخدام التيار المتغير يحدث فقد في القدرة (يسمى فقد التخلف المغناطيسي) بطريقة دورية مما يتسبب في رفع درجة حرارة القلب الحديدي . لهذا فإن القلب الحديدي للأدوات الإلكترونية التي تعمل بالتيار المتغير تستخدم صفائح الحديد المطاوع وصفائح الصلب السيليكون* التي لها حلقة تخلف مغناطيسي ذات مساحة صغيرة، وذلك لتقليل فقد التخلف المغناطيسي . أما في المغناطيسات الثابتة حيث يطبق كثافة الفيض المغناطيسي المتبقى والقوة الجبرية لشدة المجال المغناطيسي فإنها تستخدم صلب (MK) ** و صلب (KS) *** التي لها حلقة تخلف مغناطيسي ذات مساحة كبيرة .

* تصنع صفائح صلب السيليكون عن طريق الدرفلة الساخنة للحديد النقي المحتوي على كمية قليلة من الكربون مع إضافة السيليكون بنسبة 1-4.5% . وتزيد كل من المقاومة النوعية والنفاذية النسبية لتقليل فقد التخلف المغناطيسي . وفي الأدوات الإلكترونية يتكون القلب الحديدي من صفائح الصلب السيليكون جنباً إلى جنب مع وجود عازل .

** صلب (MK) هو سبيكة من الصلب تحتوى على 15-40% نيكل و 9-15% ألومنيوم وقليل من الكوبالت . وهذه هي مادة المغناطيس الثابت ولها خواص مغناطيسية ممتازة ودرجة ثبات أفضل من المادة المقساة . وثمان هذه السبيكة أرخص من صلب (KS) .

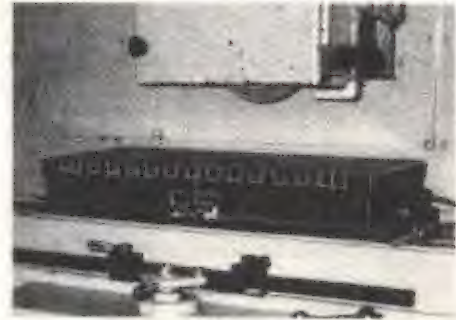
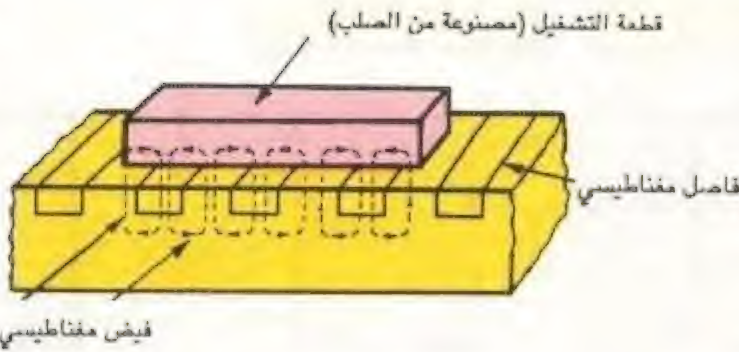
*** صلب (KS) هو سبيكة صلب تحتوى على 6 - 8% تنجستن ، 1 - 3% كروم، 20-36% كوبالت ، 0.7 - 1.5% كربون، وهى أفضل المواد المقساة .

الماسك الكهرومغناطيسي في ماكينة التجليخ السطحي

يمكن للقوة الكهرومغناطيسية إمساك قطعة تشغيل مصنوعة من الصلب باستخدام قوة الجذب الناشئة من مغناطيس كهربائي عند امرار تيار في الملف .

في قمة الماسك الكهرومغناطيسي يوجد قطب مصنوع من الصلب وفاصل مغناطيسي مدفون من النحاس و النحاس الأصفر. توضع المادة المصنوعة من الصلب على أقطاب N وأقطاب S بحيث تغطي الفواصل المغناطيسية، وتثبت إلى الماسك الكهرومغناطيسي بقوة الجذب المتولدة بواسطة الفيض المغناطيسي .

عند زيادة التيار تزيد قوة الجذب وترتفع درجة الحرارة وتسوء دقة العمليات، وتتم إزالة المادة بتغيير اتجاه التيار عدة مرات لإزالة التمهنت المتبقي، حيث إن التمهنت المتبقي يجعل عملية الإزالة صعبة بعد قطع التيار .



الشكل ٢ - ٢٩ الفيض المغناطيسي المتولد

بواسطة الملف الكهرومغناطيسي الداخلي يجذب قطعة التشغيل .

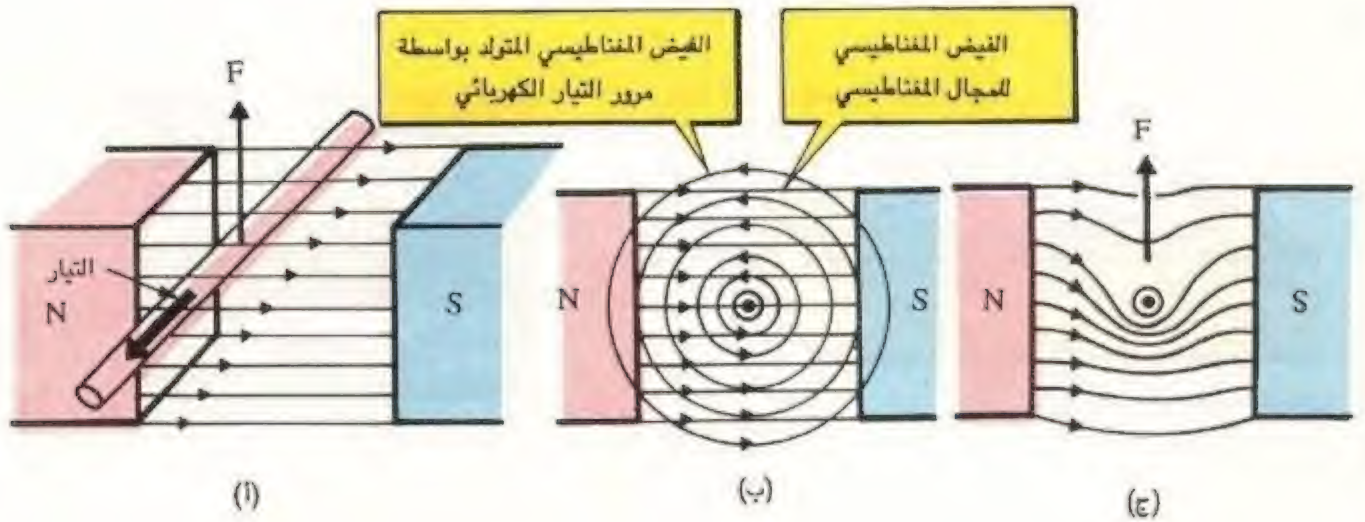
٢ - ٤ القوة الكهرومغناطيسية والمحرك

٢ - ٤ - ١ القوة المؤثرة على تيار كهربائي في مجال مغناطيسي

أ - القوة الكهرومغناطيسية Electromagnetic force

كما في الشكل ٢ - ٣٠ (أ) عند مرور تيار في موصل موضوع في مجال مغناطيسي يتحرك الموصل في اتجاه الأسهم . وهذه الحركة سببها قوة F عمودية على كل من التيار والمجال المغناطيسي .

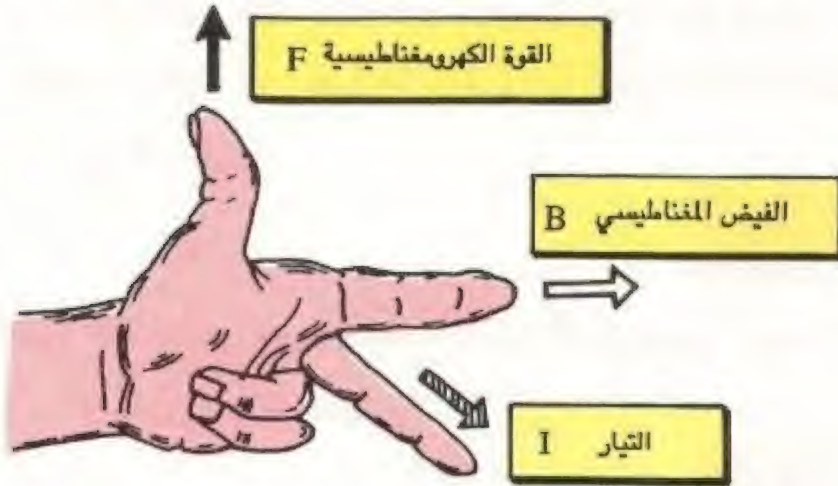
تقوم القوة الكهرومغناطيسية بدفع الموصل إلى أعلى حيث إن محصلة الفيض المغناطيسي تكون قليلة أعلى الموصل، وتكون كبيرة أسفل الموصل كما في الشكل ٢ - ٣٠ (ب) والشكل ٢ - ٣٠ (ج) .



الشكل ٢ - ٣٠ القوة الكهرومغناطيسية

ب- اتجاه وقية القوة الكهرومغناطيسية

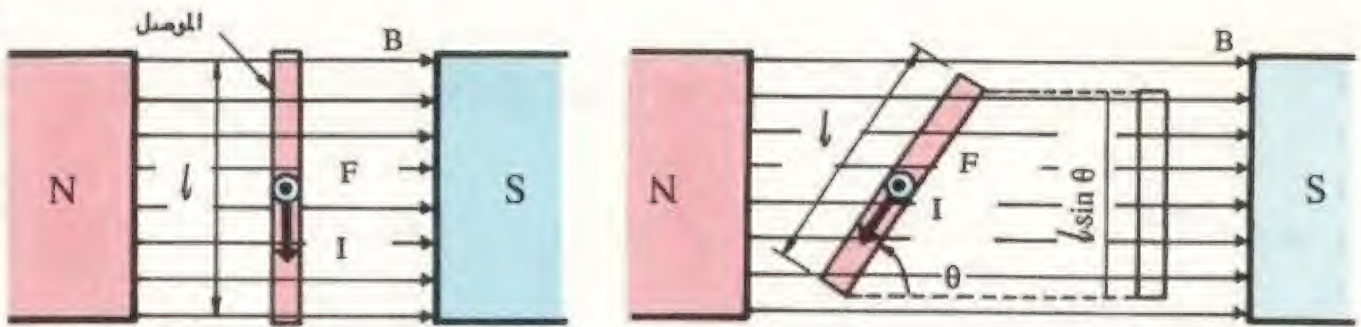
يمكن معرفة اتجاه القوة الكهرومغناطيسية ببساطة باستخدام الطريقة الآتية :



الشكل ٢ - ٣١ قاعدة اليد اليسرى لفلمنج .

Fleming's left hand rule

يبين الشكل ٢ - ٣١ اتجاهات التيار والفيض المغناطيسي والقوة الكهرومغناطيسية والعلاقات بينها . وهى مبينة بالأصابع الوسطى والسبابة والإبهام حيث يتعامد كل إصبع على الإصبعين الآخرين . وهذه العلاقة تسمى قاعدة اليد اليسرى لفلمنج .



(أ) الموصل عمودي على المجال المغناطيسي

(ب) الموصل يصنع زاوية θ مع المجال المغناطيسي

الشكل ٢ - ٣٢ قيمة القوة الكهرومغناطيسية .

يمكن حساب قيمة القوة الكهرومغناطيسية باستخدام المسقط الأفقى لشكل ٢ - ٣٠ (أ) .
عند مرور التيار $I [A]$ في موصل عمودى على المجال المغناطيسي*، حيث كثافة الفيض
المغناطيسي $B [T]$ كما فى الشكل ٢ - ٣٢ (أ) تنشأ قوة قيمتها $f = BI[N/m]$ لكل
1 متر طولى من الموصل . فإذا كان طول الموصل $l [m]$ فإن القوة الكهرومغناطيسية $F[N]$
المؤثرة عليه تكون قيمتها كما يلى :

$$F = Bl \quad [N] \quad (2-17)$$

وعموماً فإن القوة المؤثرة على موصل يصنع زاوية θ مع اتجاه المجال المغناطيسي كما فى
الشكل ٢ - ٣٢ (ب) تكون قيمتها كما يلى :

$$F = Bl \sin \theta \quad [N] \quad (2-18)$$

مثال ٧

يمر تيار قيمته 20 أمبير في موصل طوله 50 سم موضوع في مجال مغناطيسي
كثافة الفيض المغناطيسي فيه 0.4 تسلا، ويصنع الموصل زاوية قدرها 30 درجة مع
اتجاه المجال المغناطيسي . احسب القوة المؤثرة على الموصل .

الحل

نقوم بالتعويض في المعادلة (2-18) بالقيم الآتية :

$$B = 0.4 T, \quad I = 20 A, \quad l = 0.5 m, \quad \theta = 30^\circ$$

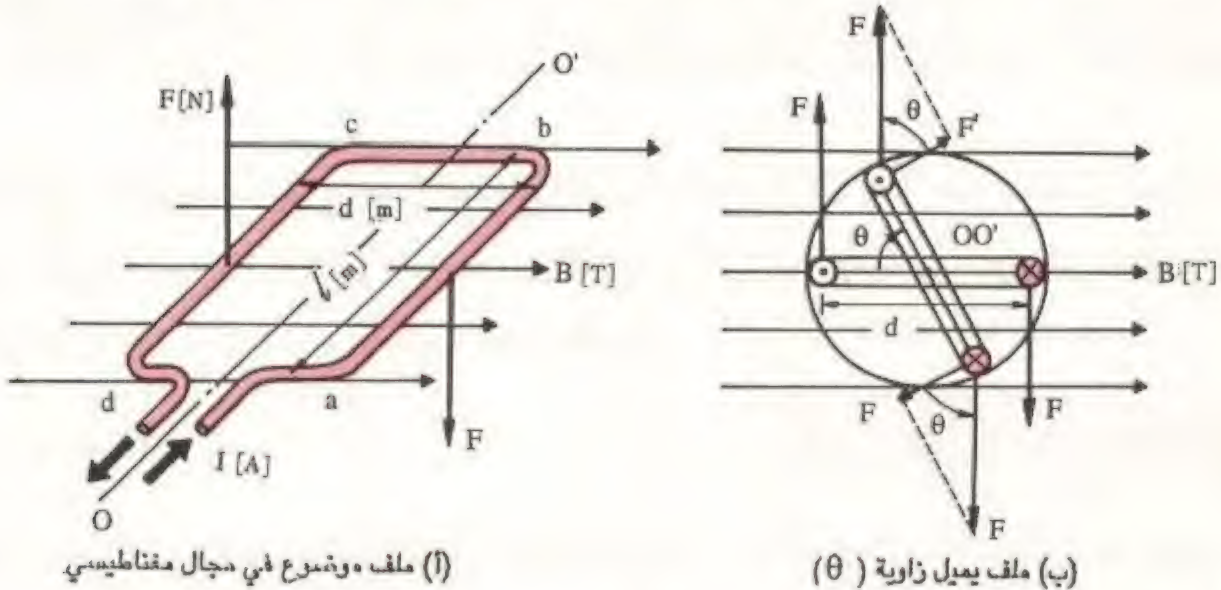
$$F = 0.4 \times 20 \times 0.5 \times \sin 30^\circ = 2 N$$

سؤال ١٠

في الشكل ٢ - ٣٢ (ب) موصل طوله 1 متر يصنع زاوية 45 درجة مع اتجاه المجال المغناطيسي، وكثافة الفيض المغناطيسي 2 تسلا . احسب التيار المار في الموصل إذا كانت القوة المؤثرة عليه 5 نيوتن .

ج - القوة المؤثرة على الملف Force acting to coil

يبين الشكل ٢ - ٣٣ (أ) تياراً $I [A]$ يمر في ملف على شكل مستطيل طوله $d [m]$ وعرضه $d [m]$ في مجال مغناطيسي منتظم كثافة الفيض المغناطيسي به $B [T]$.



الشكل ٢ - ٣٣ القوة الكهرومغناطيسية المؤثرة على ملف موضوع في مجال مغناطيسي

الجانبان (ab) ، (cd) للملف عموديان على المجال المغناطيسي، وتؤثر عليهما القوى الكهرومغناطيسية أما الجانبان (ad) ، (bc) فهما موازيان للمجال المغناطيسي ولا تؤثر عليهما أية قوى كهرومغناطيسية .

ويمكن إستخدام المعادلة (2-17) لحساب قيمة القوة الكهرومغناطيسية $F [N]$ التي تؤثر على كل من الجانبين (ab) , (cd) للملف كالاتى :

$$F = BIl \quad [N]$$

القوة التي تؤثر على الجانب (ab) تكون معاكسة للقوة التي تؤثر على الجانب (cd) في الاتجاه ومساوية لها في المقدار، وينشأ ازدواج من هذه القوى مركزه المحور (oo') كما في الشكل ٢ - ٣٣ (ب) .

* بيان الاتجاه كما في الشكل ٢ - ١٤ ينطبق على أية قوة بالإضافة إلى القوة الكهرومغناطيسية .

التأثير الناتج من ازدواج القوى يسمى العزم . والعزم (T) يعبر عنه بحاصل ضرب قيمة إحدى قوتي الازدواج (F) في المسافة بين القوتين (d) . وحدة قياس العزم هي نيوتن . متر . ويرمز لها بالرمز $[N.m]$. ويحسب العزم كما يلي :

$$T = Fd = BIl \sin \theta \quad [N.m] \quad (2-19)$$

إذا كانت الزاوية بين الملف والمجال المغناطيسي هي (θ) فإن العزم يكون كما يلي :

$$T = Fd = BIl \cos \theta \quad [N.m] \quad (2-20)$$

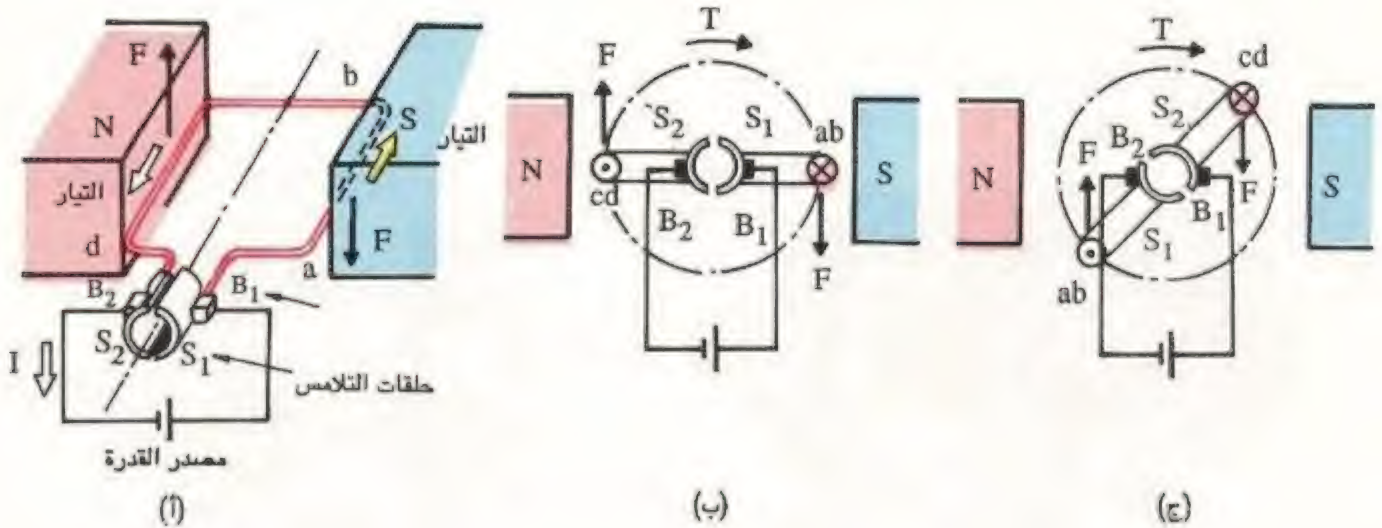
إذا كان عدد لفات الملف (N) يكون العزم الكلى N مضروباً في القيمة المحسوبة من المعادلة (2-20) .

يستخدم هذا المبدأ في عمل المحرك والأدوات الكهربائية.

د - محرك التيار المستمر Direct current motor

كما في شكل ٢ - ٣٤ يدور ملف على شكل مستطيل بحرية في مجال مغناطيسي . وتوجد حلقات تلامس (S_1) , (S_2) مصنوعة من شرائح معدنية ولها شكل نصف اسطوانة تتلامس معها الفرش (B_1) , (B_2) .

عند مرور التيار في الملف في الاتجاه المبين بالشكل ٢ - ٣٤ (أ) تتولد قوة دافعة كهربائية (F) في اتجاه يتحدد طبقاً لقاعدة اليد اليسرى لفلمنج في الجوانب (ab) , (cd) . وهكذا فإن العزم (T) يؤثر في الاتجاه المبين بالشكل ٢ - ٣٤ (ج) . تتغير حلقات تلامس (S_1) , (S_2) مع كل من (B_1) , (B_2) مما يجعل التيار يمر في اتجاه عكسي . وهكذا يعمل العزم في الاتجاه نفسه دائماً مما يجعل الملف يستمر في الدوران . وهذا هو مبدأ عمل محرك التيار المستمر .



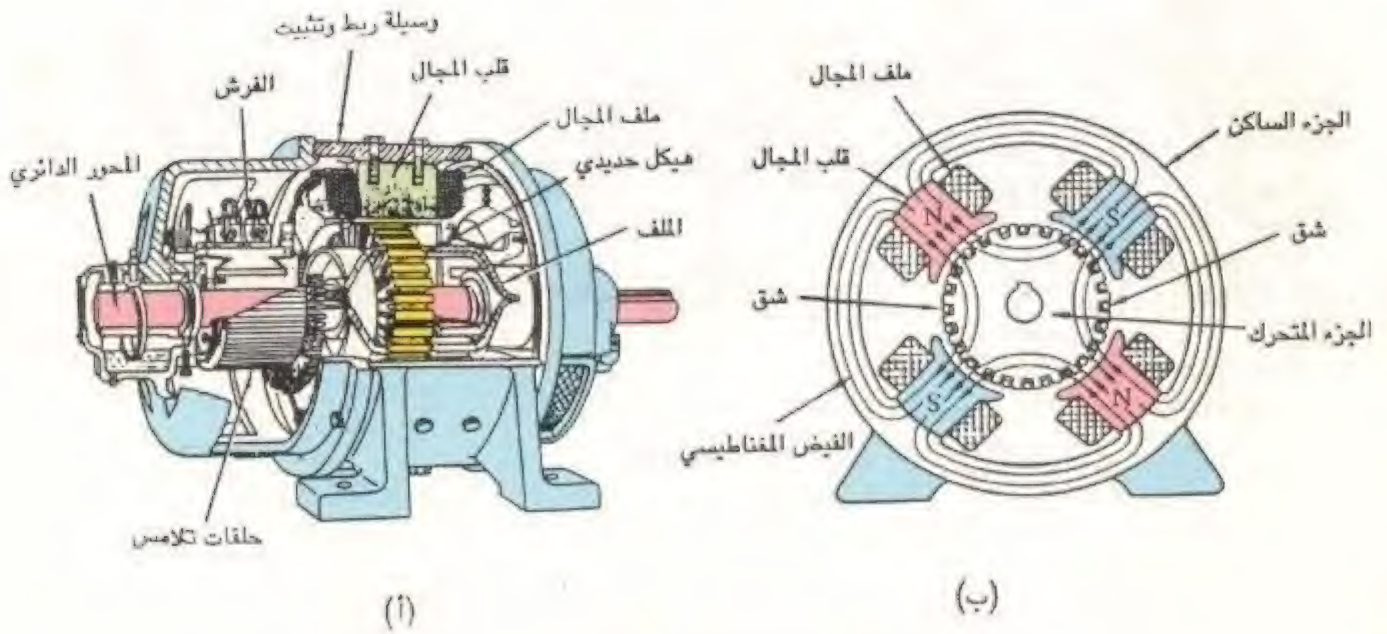
الشكل ٢ - ٣٤ مبدأ عمل محرك التيار المستمر .

يبين الشكل ٢ - ٣٥ تركيب محرك التيار المستمر حيث يحتوى هذا المحرك على جزء ثابت يقوم بتوليد الفيض المغناطيسي، وجزء متحرك يدور فيقطع الفيض المغناطيسي. ويحتوى الجزء الثابت على نظام المجال ووسيلة ربط وتثبيت؛ أما الجزء المتحرك فيحتوى على هيكل حديدي وحلقات تلامس (أو مبدلات).

نظام المجال الذى يقوم بتوليد الفيض المغناطيسي هو مغناطيس كهربائي، ويوجد الملف حول قلب حديدي أما أقطاب S, N فهي منظمة بالتناوب.

تحتوي وسيلة الربط والتثبيت على الدائرة المغناطيسية التي تمرر الفيض المغناطيسي وفي الوقت نفسه تكون الغلاف الخارجي.

يبين الشكل ٢ - ٣٥ (ب) مبدأ عمل محرك التيار المستمر. أما المحرك الفعلى فله عدد أكبر من الأقطاب. والشكل ٢ - ٣٥ (أ) يبين قطاع واحد فقط لنظام المجال يتكون من قلب حديدي وملف.



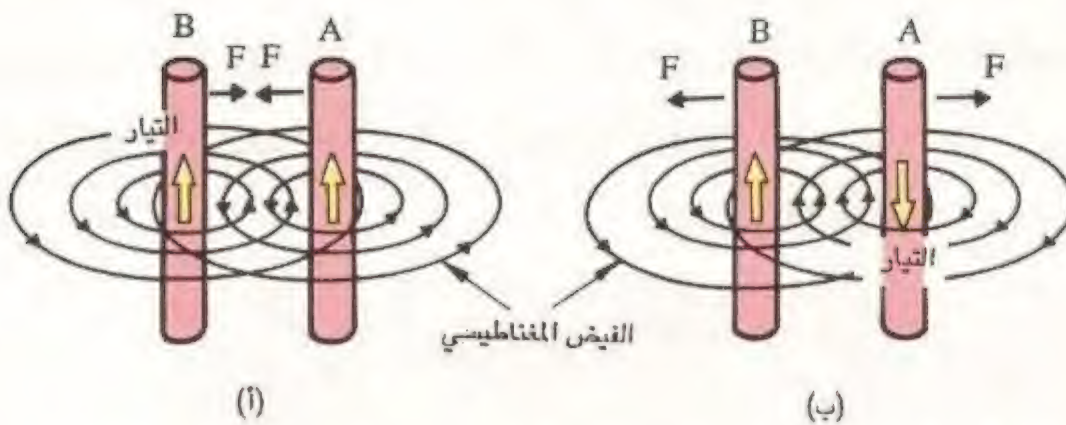
الشكل ٢ - ٣٥ تركيب محرك التيار المستمر

ويتكون الهيكل من قلب حديدي مثبت إلى محور بالإضافة إلى ملف . في المحرك الفعلي هناك عدد كبير من الملفات موزعة في أخاديد (تسمى شقوق الهيكل الحديدي) في القلب الحديدي مع اختلاف قليل في وضع كل ملف عن الملف المجاور له . والعزم الناتج المتولد بواسطة كل هذه الملفات يعطى قوة دوران شديدة .

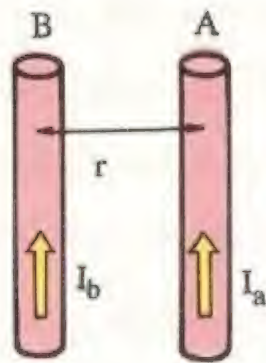
أما حلقات التلامس فتتكون من عدد من الشرائح المنظمة في شكل أسطوانة تسمح للتيار بالمرور إلى ملفات الهيكل الحديدي خلال الفرش التي تلامس هذه الحلقات .

٢ - ٤ - ٢ القوة المؤثرة على موصلات يمر بها تيار

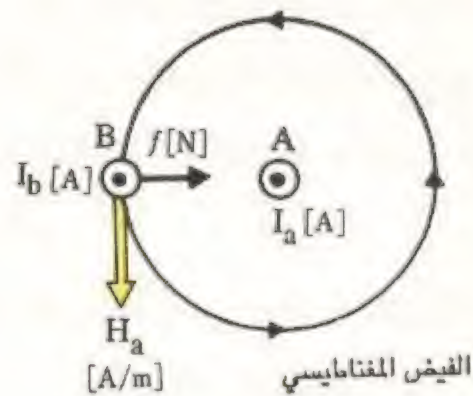
في الشكل ٢ - ٣٦ يتسبب مرور التيار خلال موصلين متوازيين في ظهور قوة تؤثر على الموصلين . هذه القوة هي قوة كهرومغناطيسية تتولد عبر المجال المغناطيسي المتولد بواسطة التيار الأول والتيار الثاني . إذا كان التياران لهما الاتجاه نفسه تحدث قوة تجاذب بين الموصلين أما إذا كان التياران في اتجاهين متضادين فتحدث قوة تنافر بين الموصلين . ويمكن شرح هذه الظاهرة عن طريق تجميع الفيض المغناطيسي . فمثلاً في الشكل ٢ - ٣٦ (أ) تنتظم الفيوض المغناطيسية خارج الموصلين فتزداد كثافتها أما بين الموصلين فتكون الفيوض المغناطيسية معاكسة لبعضها مما يؤدي إلى إنقاص كثافتها . وينشأ عن ذلك قوة تجاذب بين الموصلين .



الشكل ٢ - ٣٦ اتجاه القوى المؤثرة على موصلين متوازيين بهما تيار .



(i)



(ب)

الشكل ٢ - ٣٧ قيمة القوى المؤثرة على موصلين متوازيين بهما تيار .

في الشكل ٢ - ٣٧ (أ) المسافة بين الموصلين المتوازيين الخطيين A , B هي $r [m]$ والتيار المار بهما في الاتجاه نفسه هو $I_a [A]$, $I_b [A]$ على الترتيب . ويبين الشكل ٢ - ٣٧ (ب) اتجاه المجال المغناطيسي عند الموصل B المتولد بواسطة مرور التيار I_a في الموصل A وقيمة هذا المجال $H_a [A/m]$ يمكن حسابها من المعادلة (2-8) كما يلي :

$$H_a = \frac{I_a}{2\pi r} [A/m]$$

يمكن حساب القوة $f [N/m]$ التي تؤثر على 1 متر من الموصل B باستخدام المعادلة التالية المستنتجة من المعادلات (2-16) و (2-17) . إذا افترضنا أن الفيض المغناطيسي عند الموصل B المتولد بواسطة مرور التيار I_a في الموصل A هو B_a فإن:

$$f = B_a I_b = \mu_o H_a I_b$$

$$= 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{I_a}{2\pi r} \times I_b = \frac{2 I_a I_b}{r} \times 10^{-7} [N/m] \quad (2-21)$$

وبالمثل فإن المجال المغناطيسي المتولد بواسطة مرور التيار I_B في الموصل B ينشأ عنه قوة تؤثر على الموصل A وقيمتها كما في المعادلة (21 - 2) .

وحدة قياس التيار الكهربائي الأمبير، ويرمز لها بالرمز { A } يمكن تعريفها باستخدام المعادلة (21 - 2) كما يلي : 1 أمبير هي شدة التيار الذي إذا مر خلال موصلين متوازيين طولهما لانهائي والمسافة بينهما 1 متر في الفراغ أدى ذلك إلى ظهور قوة تؤثر على الموصلين قيمتها 2×10^{-7} نيوتن لكل 1 متر طول .

سؤال ١١

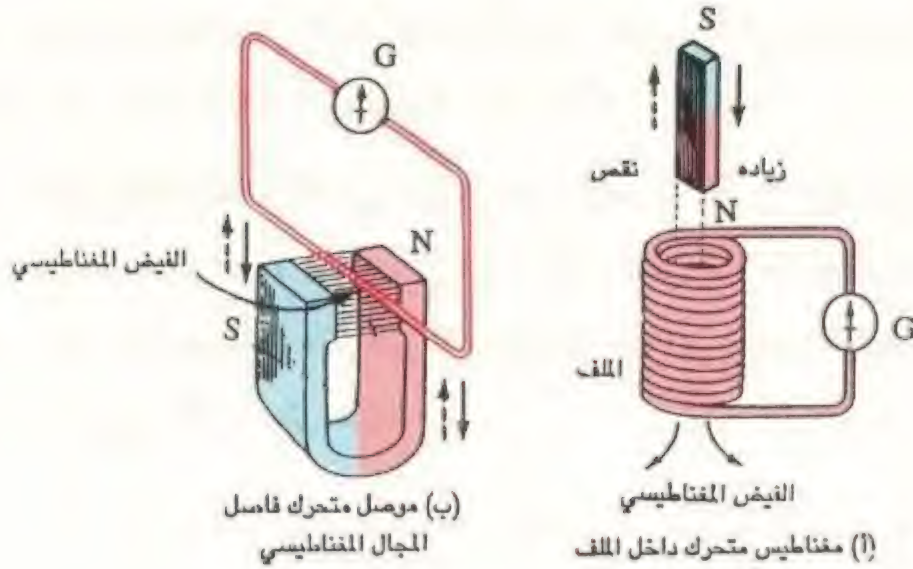
موصلان متوازيان في الهواء المسافة بينهما 5 سم، ويمر خلال كل منهما تيار قيمته 0.1 أمبير . احسب القوة المؤثرة على 1 متر من الموصل .

٢ - ٥ الحث الكهرومغناطيسي والمولد

Electromagnetic Induction and Generator

٢ - ٥ - ١ الحث الكهرومغناطيسي

عند تحريك مغناطيس داخل وخارج ملف كما في الشكل ٢ - ٣٨ (أ) أو عند تحريك موصل داخل مجال مغناطيسي كما في الشكل ٢ - ٣٨ (ب) يتأرجح مؤشر الجلفانومتر مما يدل على مرور تيار . وهذه الظاهرة سببها أن عدد الفيض المغناطيسي الذي يمر خلال الملف يتغير مع الزمن، أو أن قطع الفيض المغناطيسي بواسطة الموصل يؤدي إلى ظهور قوة دافعة كهربائية في الملف أو الموصل . هذه الظاهرة تسمى الحث الكهرومغناطيسي وفيها تتولد قوة دافعة كهربائية عن طريق الحث ويسمى التيار المار (التيار الحثي) .



الشكل ٢ - ٣٨ الحث الكهرومغناطيسي

٢ - ٥ - ٢ اتجاه وقيمة القوة الدافعة الكهربائية الحثية

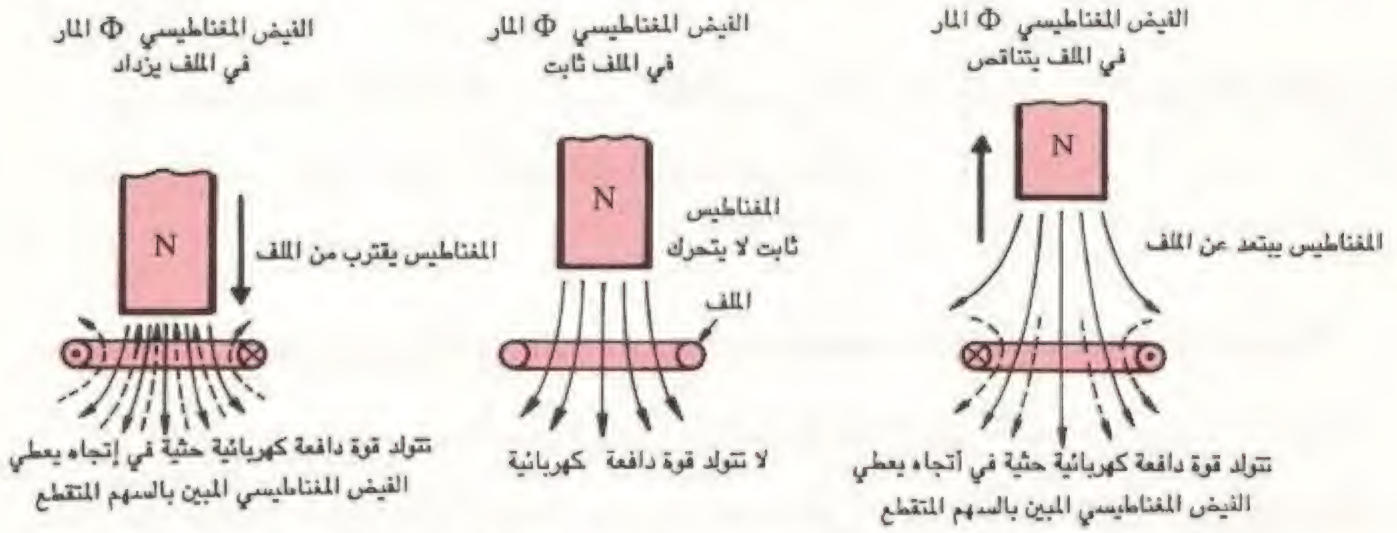
١ - التغير في الفيض المغناطيسي المار بملف

في التجربة المبينة في الشكل ٢ - ٣٨ (أ) نجد أن زيادة سرعة تحريك المغناطيس أو زيادة عدد لفات الملف تؤدي إلى زيادة تأرجح مؤشر الجلفانومتر G . أي إن قيمة القوة الكهرومغناطيسية المتولدة بالحث الكهرومغناطيسي تتناسب مع حاصل ضرب (معدل تغير كمية الفيض المغناطيسي المار في الملف بالنسبة للزمن) في عدد لفات الملف . هذه العلاقة هي قانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي ، فعندما يتغير الفيض المغناطيسي المار في ملف عدد لفاته N بانتظام بمقدار $\Delta\Phi [Wp]$ خلال مدة زمنية $\Delta t [S]$ تتولد القوة الدافعة الكهربائية الحثية $e [V]$ طبقاً للمعادلة :

$$e = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} [V]$$

(2 - 22)

يبين الشكل ٢ - ٣٩ أن القوة الدافعة الكهربائية الحثية تعكس اتجاهها عندما يتحول التغير الحادث في الفيض المغناطيسي Φ من الازدياد الى التناقص . أي إن القوة الدافعة الكهربائية الحثية تكون في اتجاه بحيث تمنع تغير قيمة الفيض المغناطيسي الأصلي بواسطة الفيض المغناطيسي المتولد نتيجة مرور تيار القوة الدافعة الكهربائية الحثية وهذا هو قانون لنز.



الشكل ٢ - ٣٩ قانون لنز Lenz's law

الإشارة السالبة في المعادلة (22 - 2) تعنى أن القوة الدافعة الكهربائية الحثية تحدث في اتجاه بحيث تمنع تغير الفيض المغناطيسي .

مثال ٨

عند تغير الفيض المغناطيسي المار في ملف بمعدل 0.5 ويبر خلال 0.2 ثانية تولدت قوة دافعة كهربائية حثية قيمتها 100 فولت . احسب عدد لفات الملف N .

الحل

نقوم بالتعويض في المعادلة (22 - 2) بالقيم الآتية :

$$e = 100 \text{ V} , \Delta \Phi = 0.5 \text{ Wb} , \Delta t = 0.2 \text{ s}$$

فَنَحْصِلُ عَلَى

$$N = 100 \times \frac{0.2}{0.5} = 40$$

سؤال ١٢

ملف عدد لفاته 50 لفة يتغير الفيض المغناطيسي المار فيه بمقدار 0.02 ويبر كل 0.1 ثانية . احسب القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في الملف .

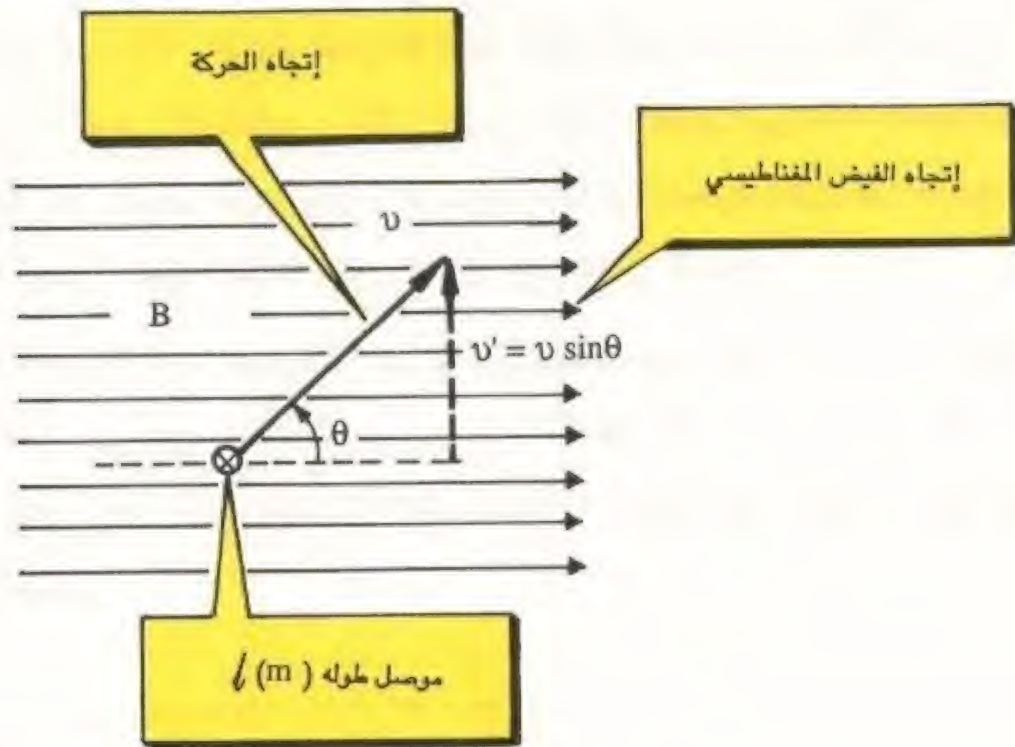
ب - الفيض المغناطيسي الذي يقطعه موصل Magnetic Flux cut off by conductor

يبين الشكل ٢ - ٤٠ مجالاً مغناطيسياً منتظماً كثافة الفيض المغناطيسي فيه $B [T]$ وضع فيه موصل طوله $[m]$ بحيث يكون عمودياً على اتجاه المجال المغناطيسي ويتحرك الموصل بحيث يصنع زاوية θ مع اتجاه المجال المغناطيسي داخل مستوى بسرعة $v[m/s]$.
الفيض للمغناطيسي $\Delta \Phi [Wb]$ الذي يقطعه الموصل خلال مدة زمنية $\Delta t [s]$ هو:

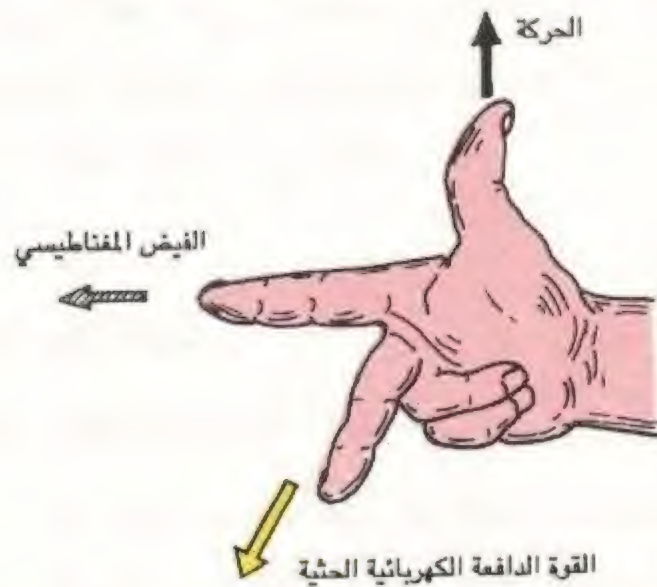
$$\Delta \Phi = B \cdot v \cdot \Delta t = B \cdot v \sin \theta \cdot \Delta t \quad [Wb]$$

والقوة الدافعة الكهربائية الحثية $e [v]$ المتولدة في الموصل هي :

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - B \cdot v \sin \theta \quad [V] \quad (2 - 23)$$



الشكل ٢ - ٤٠ القوة الدافعة الكهربائية الحثية



الشكل ٢ - ٤١ قاعدة اليد اليمنى لفلمنج .

Fleming's right hand rule

يبين الشكل ٢ - ٤١ اتجاه القوة الدافعة الكهربائية الحثية . فإذا كان إصبع السبابة يشير إلى اتجاه الفيض المغناطيسي وكان إصبع الإبهام يشير إلى اتجاه الحركة فإن الإصبع الوسطى يشير إلى اتجاه القوة الدافعة الكهربائية الحثية ، بحيث يكون كل اصبع عمودياً على الإصبعين الآخرين . هذه العلاقة تسمى قاعدة اليد اليمنى لفلمنج .

يستخدم الحث الكهرومغناطيسي على نطاق واسع . من أمثلة ذلك المحول الذي تتولد قوة دافعة كهربائية حثية في ملفه الثانوى عند تغير الفيض المغناطيسي المار بالملف الابتدائي ، أيضاً المولد الذي يقوم بتوليد قوة دافعة كهربائية حثية في الموصل عند تحريك الموصل داخل الفيض المغناطيسي .

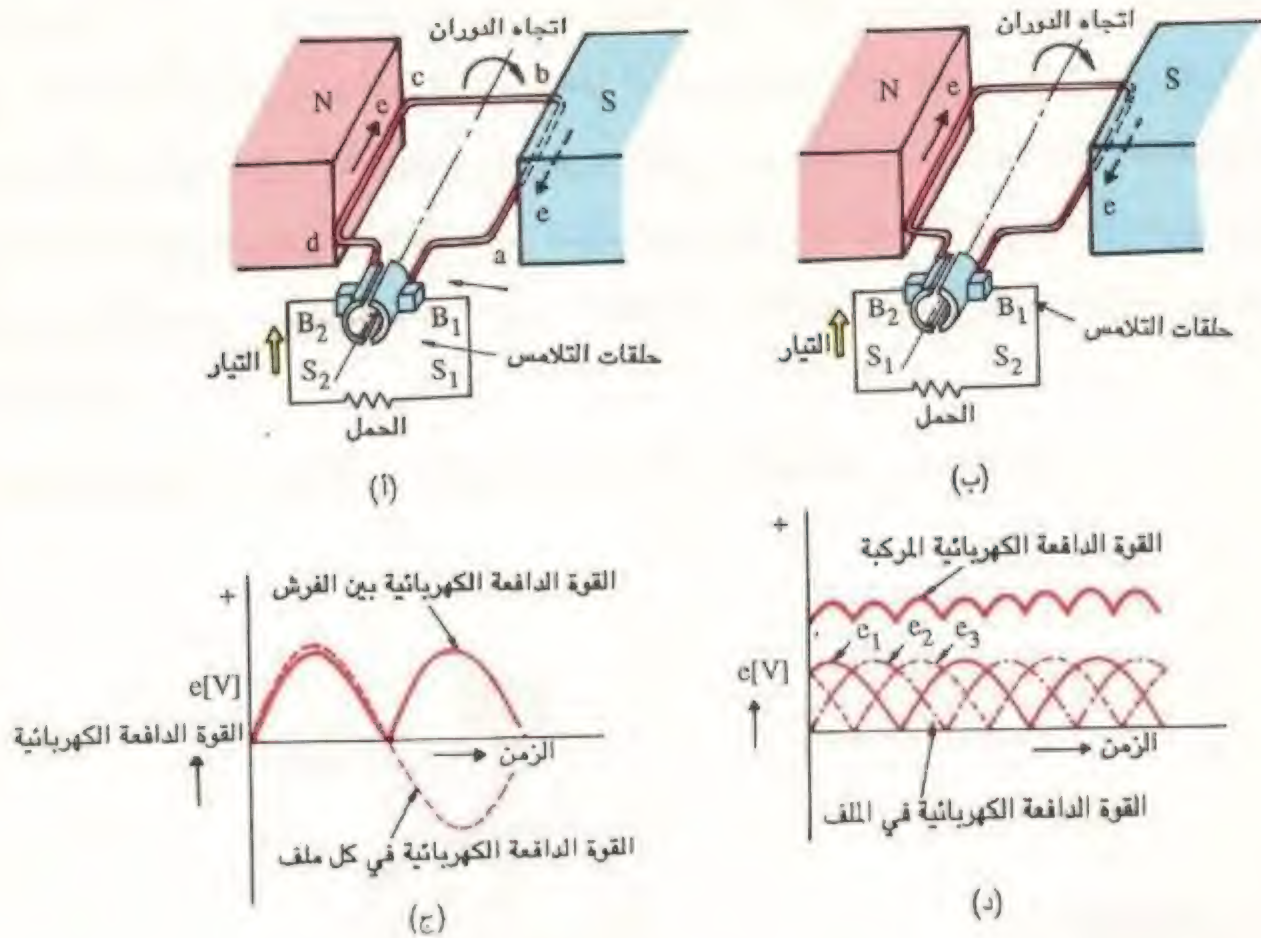
سؤال ١٣

موصل طوله 0.2 متر وضع عمودياً على اتجاه المجال المغناطيسي في مجال مغناطيسي منتظم ، حيث كثافة الفيض المغناطيسي 0.1 تسلا . إذا حرك هذا الموصل عمودياً على اتجاه المجال المغناطيسي ذهاباً وإياباً بسرعة 50 متر / ثانية . احسب القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الموصل .

٢ - ٥ - ٣ مبادئ عمل المولد

أ - مولد التيار المستمر DC Generator

مولد التيار المستمر ومحرك التيار المستمر لهما التركيب نفسه بصورة أساسية . فنجد في المولد أن المحرك يدير الجزء الدوار ويمر التيار من الخارج إلى الجزء الدوار .



الشكل ٢-٤٢ مبدأ عمل مولد التيار المستمر

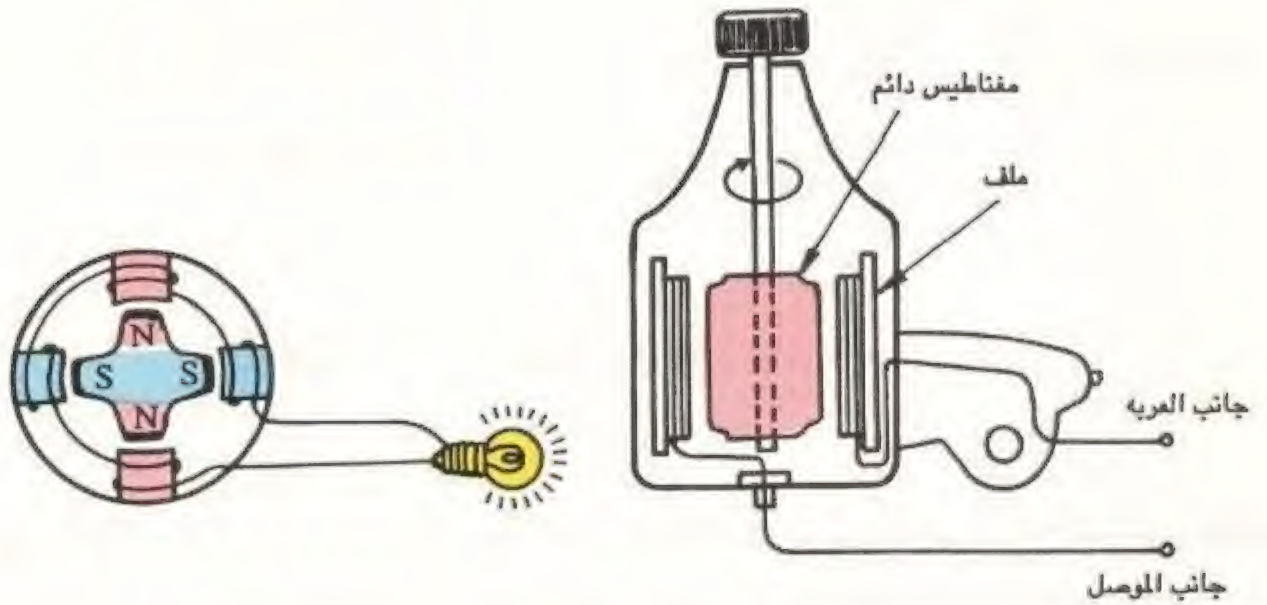
يبين الشكل ٢-٤٢ مبدأ عمل مولد التيار المستمر . يتصل الملف (abcd) مع حلقات التلامس S_1 , S_2 . وعند إدارة هذا الملف بقوة خارجية تتولد القوة الدافعة الكهربائية e في الملف في الاتجاه المبين بالشكل ٢-٤٢ (أ) عن طريق الحث الكهرومغناطيسي .

ب- المولد الكهربائي في الدراجة Generator for bicycle

وعلى عكس الشكل ٢-٤٢ يوجد مولد كهربائي يستخدم في تغذية لمبة الدراجة ويعتمد عمل هذا المولد على إدارة المغناطيس بدلاً من الملف (أى أن الملف هنا يكون ثابتاً) . وكما في

الشكل ٢ - ٤٣ نجد مغناطيساً دائماً له أربعة أقطاب عند مركز وعاء المولد . وهناك رأس دوار مثبت مباشرة في هذا المغناطيس ، وهذا الرأس يتلامس مع الإطار الكاوتشوك للدراجة ؛ ومع حركة الدراجة يدور الإطار فيدور الرأس وبالتالي يدور المغناطيس . وهناك 4 ملفات مثبتة في الجزء الثابت للمولد حول المغناطيس تتولد فيها القوة الدافعة الكهربائية عن طريق الحث الكهرومغناطيسي . وبزيادة سرعة دوران الإطار تزيد القوة الدافعة الكهربائية فتزيد شدة إضاءة الللمبة .

وهناك تركيبات أخرى للمولد الكهربائي للدراجة تستخدم نفس مبدأ العمل .



الشكل ٢ - ٤٣ المولد الكهربائي في الدراجة

إذا رجعنا إلى الشكل ٢ - ٤٢ نجد أنه عند إدارة الملف بمقدار نصف دورة فإن اتجاه القوة الدافعة الكهربائية في الجوانب (ab) ، (cd) يتحول إلى الاتجاه العكسي كما في

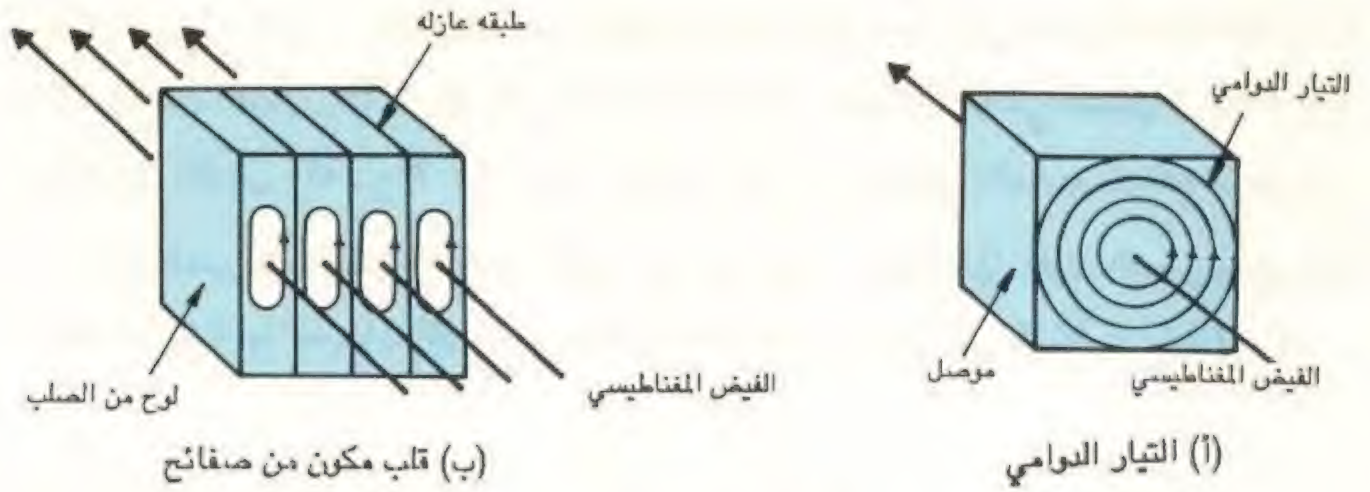
الشكل ٢ - ٤٢ (ب) . ومع ذلك فإن القوة الدافعة الكهربائية التي تغذى الدائرة الخارجية والمأخوذة من الفرش B_1 , B_2 يكون لها دائماً الاتجاه نفسه، كما في الشكل ٢-٤٢ (ج) لأن تلامس الفرش B_1 , B_2 مع حلقات التلامس S_1 , S_2 يتغير بالتناوب كل نصف دورة . وعادة تتغير قيمة القوة الدافعة الكهربائية مع الزمن . ولهذا فإن المولد الفعلي يعطي قوة دافعة كهربائية لها تموجات أقل مع مزيد من الملفات كما هو مبين في الشكل ٢-٤٢ (د) .

٢ - ٥ - ٤ التيار الدوامي Eddy current

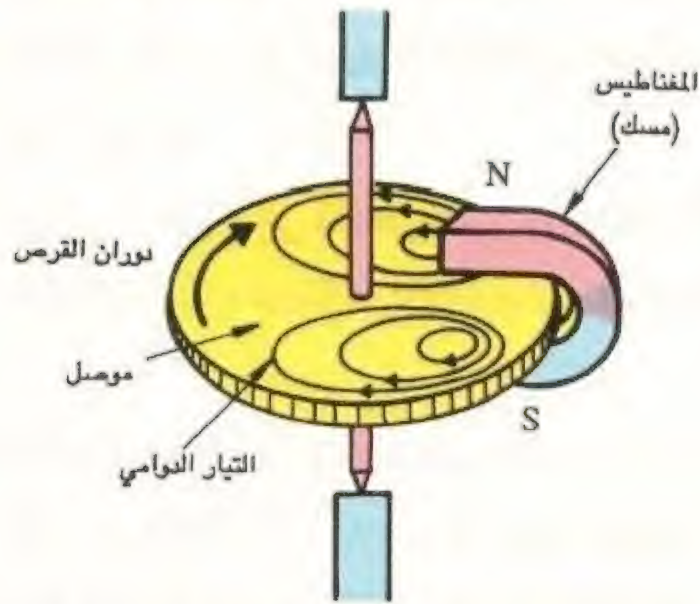
يبين الشكل ٢ - ٤٤ (أ) أن تغير الفيض المغناطيسي (الذي يخترق الموصل) يقوم بتوليد قوة دافعة كهربائية في الموصل عن طريق الحث الكهرومغناطيسي، ينشأ عنها تيار في شكل دوامات يسمى التيار الدوامي .

ويؤدي مرور التيار الدوامي i [A] إلى فقد في القدرة قيمته Ri^2 [W] حيث R [Ω] هي مقاومة المسار ، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الموصل . وهذا الفقد يسمى فقد التيار الدوامي .

في الأدوات الكهربائية مثل المحول نستخدم قلب مكون من صفائح من الصلب الرقيق معزولة عن بعضها كما في الشكل ٢ - ٤٤ (ب) . وهذه الطريقة تجعل مقاومة القلب الحديدي كبيرة فتقل قيمة التيار الدوامي، وبالتالي يقل فقد التيار الدوامي . وتستخدم عادة مواد مثل الفيرايت * (ذات قيمة أقل لفقد التيار الدوامي) في الدائرة المغناطيسية التي تستخدم تيار تردد عالٍ ؛ لأن فقد التيار الدوامي يتناسب مع مربع التردد .



الشكل ٢ - ٤٤ التيار الدوامي



الشكل ٢ - ٤٥ الفرمة باستخدام التيار الدوامي

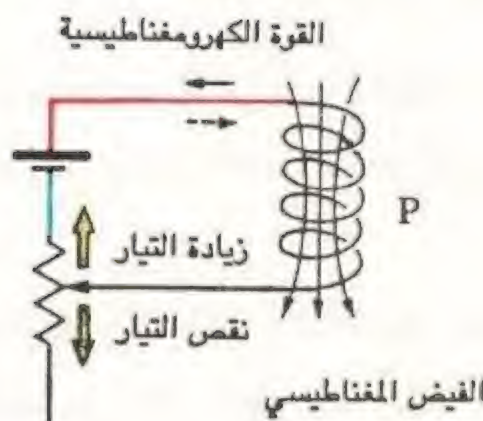
يبين الشكل ٢ - ٤٥ أن دوران موصل على شكل قرص في مجال مغناطيسي يؤدي إلى توليد التيار الدوامي وتقوم القوة الكهرومغناطيسية الناشئة من المجال المغناطيسي بتثبيط وإعاقة حركة دوران القرص ، وتطبق هذه الحقيقة في كبح حركة مقياس الطاقة (الواتميتر) . أضف إلى ذلك أن الحرارة المتولدة نتيجة فقد التيار الدوامي يمكن استخدامها في الأفران الكهربائية التي تعتمد على التسخين عن طريق حث التردد العالي .

* الفيرايت هو مادة مغناطيسية تتكون من أكاسيد النيكل والحديد مصنوعة بطريقة التسخين بدون صهر . ولها مقاومة كهربائية عالية لتقليل فقد التيار الدوامي عند استخدامها في قلب المحول .

٢ - ٦ معامل الحث أو المحاثة Inductance

٢ - ٦ - ١ الحث الذاتي ومعامل الحث الذاتي

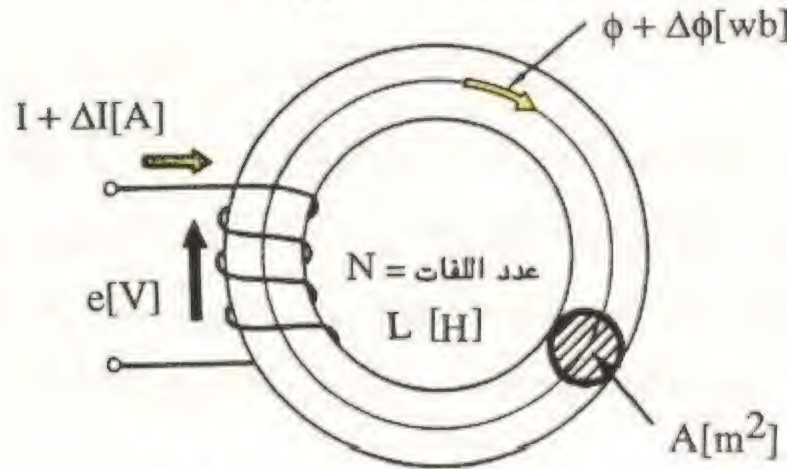
عند تغير التيار المار في ملف تحدث ظاهرة تولد القوة الدافعة الكهربائية في الملف فيقوم التيار المار في الملف بتوليد الفيض المغناطيسي الذي يتقاطع مع الملف. ويبين الشكل ٢ - ٤٦ أن تغيير التيار المار في الملف P يؤدي إلى تغيير الفيض المغناطيسي الذي يتقاطع مع الملف، وينتج عن ذلك توليد قوة كهرومغناطيسية في الملف في اتجاه بحيث تمنع تغير الفيض المغناطيسي .



الشكل ٢ - ٤٦ الحث الذاتي self induction

هذه الظاهرة تسمى الحث الذاتي والقوة الدافعة الكهربائية المتولدة تسمى القوة الدافعة الكهربائية للحث الذاتي .

يبين الشكل ٢ - ٤٧ أنه عند تغيير التيار المار في ملف عدد لفاته N بمقدار $\Delta I [A]$ خلال مدة زمنية $\Delta t [s]$ يتغير الفيض المغناطيسي بمقدار $\Delta \Phi [Wb]$ ، وتولد قوة دافعة كهربائية $e [V]$ بالحث الذاتي قيمتها كما يلي :



الشكل ٢ - ٤٧ معامل الحث الذاتي .

$$e = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} [V] \quad (2-24)$$

ثابت التناسب L هو معامل الحث الذاتي ووحدة قياسه الهنرى ويرمز له بالرمز $[H]$.
معامل حث ذاتي قيمته 1 هنرى ينتج قوة دافعة كهربائية قيمتها 1 فولت عند تغيير التيار بمعدل 1 أمبير / ثانية .

العلاقة $(N \Phi = LI)$ مستنتجة من المعادلة (2-24) على أساس أن قيمة النفاذية μ ثابتة، وأن الفيض المغناطيسي يتناسب مع التيار . وعلى هذا يمكننا أن نعبر عن L كما يلي:

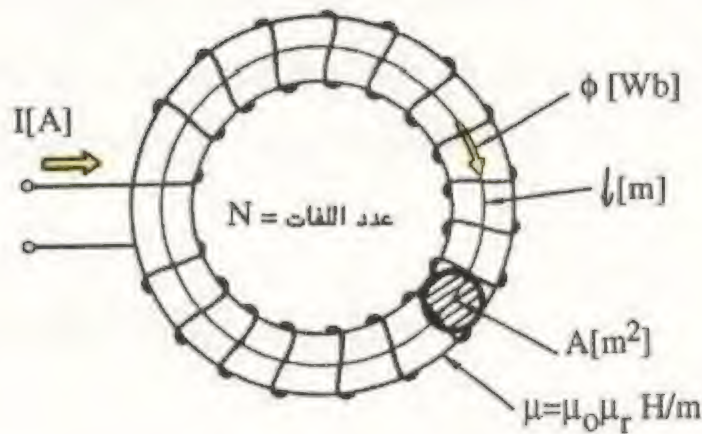
$$L = \frac{N \Phi}{I} [H] \quad (2-25)$$

تعتمد قيمة معامل الحث الذاتي للملف على شكله وعدد لفاته ونفاذية مادة المسار المغناطيسي. المقاومة المغناطيسية تحسب بقسمة القوة الدافعة على الفيض المغناطيسي، ووحدة قياسها هي $[A/Wb]$. ومع ذلك فإن وحدة قياسها تكتب في الصورة $[H^{-1}]$ في المعادلة (2-11) لأن $[Wb/A] = [H]$ من المعادلة (2-25).

٢ - ٦ - ٢ معامل الحث الذاتي للملف

أ - معامل الحث الذاتي للملف حلقي

يمكن حساب معامل الحث الذاتي للملف الحلقي المبين في الشكل ٢ - ٤٨ كما يلي:



الشكل ٢ - ٤٨ معامل الحث الذاتي للملف حلقي

عندما يمر التيار $I [A]$ في ملف عدد لفاته N ومساحة مقطع المسار المغناطيسي $A [m^2]$ وطول المسار المغناطيسي $l [m]$ والنفاذية $\mu [H/m]$ ينتج فيض مغناطيسي $\Phi [Wb]$ في الدائرة المغناطيسية، ويمكن حساب قيمة هذا الفيض باستخدام المعادلة المستنتجة من العلاقات (2-14) و (2-15) و (2-16) كما يلي :

$$\Phi = B A = \mu H A = \frac{\mu N I A}{\ell} \quad [\text{Wb}] \quad (2-26)$$

ولهذا فإن معامل الحث الذاتي $L [H]$ يمكن التعبير عنه بالمعادلة المستنتجة من العلاقة (2-25) كما يلي :

$$L = \frac{N \Phi}{I} = \frac{\mu A N^2}{\ell} \quad [H] \quad (2-27)$$

مثال ٩

إذا كانت مساحة مقطع الملف الحلقي المبين في الشكل ٢ - ٤٨ هي 5 سم² وطول المسار المغناطيسي 50 سم وعدد لفات الملف 1000 لفة والنفاذية النسبية 1000 . احسب معامل الحث الذاتي للملف إذا كان $\mu [H/m] = \mu_0 \mu_r$.

الحل

نقوم بالتعويض في المعادلة (2-27) بالقيم الآتية :

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}, \mu_r = 1000, A = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2, N = 1000, \ell = 0.5 \text{ m}$$

فنحصل على :

$$L = 4\pi \times 10^{-7} \times 1000 \times 5 \times 10^{-4} \times \frac{(1000)^2}{0.5} = 1.26 \text{ H}$$

سؤال ١٤

عند مرور تيار قيمته 5 أمبير في ملف حلقى عدد لفاته 800 لفة حدث فيض مغناطيسي قيمته 2×10^{-5} ويبر . احسب معامل الحث الذاتي للملف .

ب - معامل الحث الذاتي ملف أسطواني

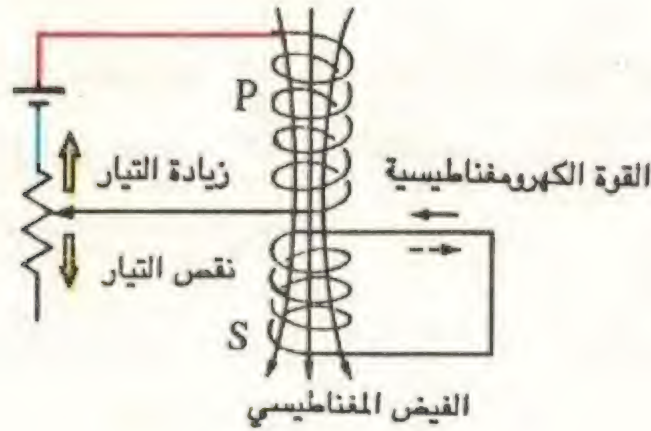
Self-inductance of cylindrical coil

إذا كانت المادة التي يخترقها المسار المغناطيسي للملف هي الهواء يكون لدينا قلب هوائي .
يبين الشكل ٢ - ٤٩ (أ) ملف أسطواني له قلب هوائي وطول لانهائي . عدد لفات هذا الملف هو N لفة لكل 1 متر طولي . ومساحة مقطعه $A \text{ (m}^2\text{)}$ ونصف قطره $r \text{ (m)}$ وقيمة النفاذية $\mu \text{ (H/m)}$. إذا مر في هذا الملف تيار $I \text{ (A)}$ فإن الفيض المغناطيسي $\phi \text{ (Wb)}$ داخل الملف يمكن حسابه من المعادلة الآتية، وهي مستنتجة من المعادلة (2-9) و(2-16) .

$$\phi = BA = \mu HA = \frac{\mu NIA}{\ell} = \frac{\mu \pi r^2 NI}{\ell} \text{ (Wb)} \quad (2-28)$$

ولهذا فإن معامل الحث الذاتي يمكن حسابه من المعادلة الآتية المستنتجة من المعادلة (2-25) :

$$L = \frac{N\phi}{I} = \frac{\mu AN^2}{\ell} = \frac{\mu \pi r^2 N^2}{\ell} \text{ (H)} \quad (2-29)$$



الشكل ٢ - ٥٠ الحث المتبادل

الملف p هو الملف الابتدائي والملف S الذي حدثت فيه القوة الدافعة الكهربائية عن طريق الحث المتبادل هو الملف الثانوي .

يبين الشكل ٢ - ٥١ الملف الابتدائي p وعدد لفاته N_1 والملف الثانوي S وعدد لفاته N_2 . عند تغيير التيار I_1 (A) في الملف الابتدائي بمقدار ΔI_1 (A) خلال مدة زمنية Δt (s) يتغير الفيض المغناطيسي ϕ (Wb) الذي يعبر إلى الملف الثانوي S بمقدار $\Delta \phi$ (Wb) . يمكن التعبير عن القوة الدافعة الكهربائية e_2 (V) المتولدة في الملف الثانوي S بالمعادلة الآتية المستنتجة من المعادلة (2-22) .

$$e_2 = -N_2 \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (V) \quad (2-31)$$

وحيث إن الفيض المغناطيسي $(N_2 \Delta \phi)$ يتناسب مع التيار (ΔI_1) يمكننا استنتاج المعادلة :

$$e_2 = -N_2 \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad (V) \quad (2-32)$$

مثال ١٠

في الملف الأسطواناني بالشكل ٢ - ٤٩ نصف قطر الملف يساوي 2 سم وطوله 10 سم وعدد اللفات لكل متر يساوي 100 والنفاذية هي $(H/m) 4\pi \times 10^{-7}$. احسب معامل الحث الذاتي للملف الأسطواناني .

الحل :

$$\frac{2r}{\ell} = \frac{2 \times 2}{10} = 0.4$$

من الشكل ٢ - ٤٩ (ب) نجد أنه عند $2r/\ell = 0.4$ فإن $\lambda = 0.85$.

نقوم بتعويض القيم الآتية في المعادلة (2-30) .

$$\lambda = 0.85 , \mu = 4\pi \times 10^{-7} (H/m) , r = 2 \times 10^{-2} m , N = 100 , \ell = 0.1m$$

فنحصل على

$$L = 0.85 \times \frac{4\pi \times 10^{-7} \times \pi \times (2 \times 10^{-2})^2}{0.1} \times (100)^2 = 134 \times 10^{-6} H = 134 \mu H$$

سؤال ١٥

في الملف الأسطواناني في مثال ١٠ ، احسب معامل الحث الذاتي إذا كان نصف قطر الملف يساوي 4.5 سم .

٢ - ٦ - ٣ الحث المتبادل Mutual induction ومعامل الحث المتبادل

يبين الشكل ٢ - ٥٠ أنه عند تغيير التيار المار في الملف P يتغير الفيض المغناطيسي الذي يعبر من الملف P إلى الملف S القريب من P وتنتج قوة دافعة كهربائية في الملف الآخر S . أي إن تغير التيار المار في أحد الملفين يؤدي إلى توليد قوة دافعة كهربائية في الملف الآخر عن طريق ظاهرة الحث المتبادل .

$$M = \frac{N_2 \phi}{I_1} = \frac{\mu A N_1 N_2}{l} \quad (H) \quad (2-35)$$

يتناسب معامل الحث الذاتي $L(H)$ في المعادلة (2-27) مع مربع عدد لفات الملف (N^2) . ويتناسب معامل الحث المتبادل $M(H)$ في المعادلة (2-35) مع حاصل ضرب عدد لفات الملف الابتدائي (N_1) في عدد لفات الملف الثانوي (N_2) . وثابت التناسب في هذه الحالة هو $(\mu A / l)$ الذي يتحدد بطول المسار المغناطيسي (m) ومساحة المقطع $A(m^2)$ والنفاذية (H / m) .

مثال ١١

في الشكل ٢ - ٥١ مساحة المقطع 5 سم² وطول المسار المغناطيسي 50 سم وعدد لفات الملف الابتدائي 1000 وعدد لفات الملف الثانوي 3000 والنفاذية النسبية 1000. احسب معامل الحث المتبادل.

الحل

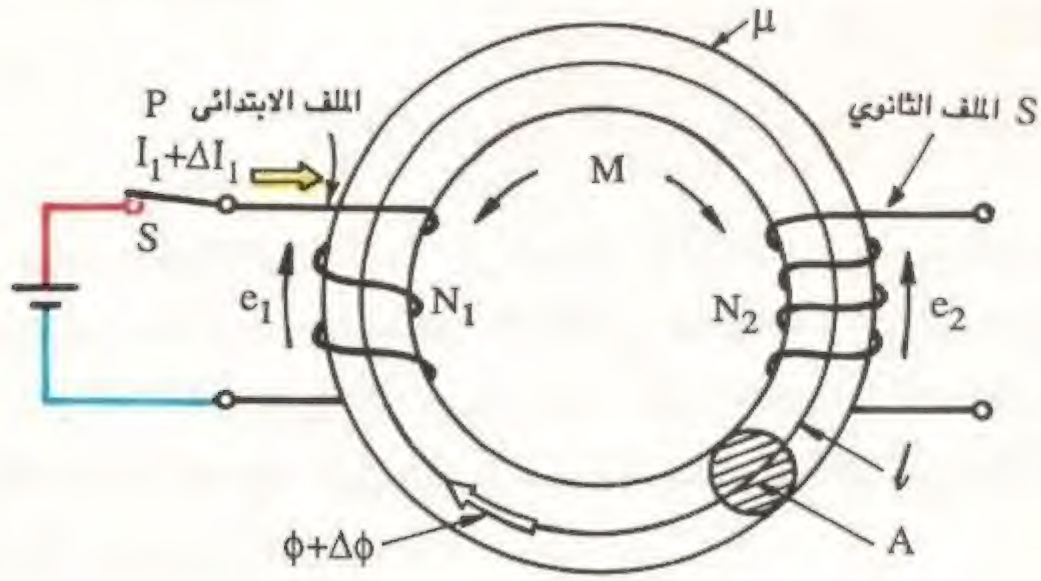
نقوم بالتعويض بالقيم الآتية في المعادلة (2-35) :

$$\mu = \mu_0 \mu_r = 4 \pi \times 10^{-7} \times 1000 = 4 \pi \times 10^{-4} \text{ H/m}$$

$$A = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2, \quad N_1 = 1000, \quad N_2 = 3000, \quad l = 0.5 \text{ m}$$

فنحصل على :

$$M = 4 \pi \times 10^{-4} \times 5 \times 10^{-4} \times 1000 \times 3000 \times \frac{1}{0.5} = 3.8 \text{ H}$$



الشكل ٢ - ٥١ معامل الحث المتبادل

في المعادلة (2-32) ثابت التناسب M يتحدد طبقاً للحالة المشتركة للملفين ويسمى معامل الحث المتبادل، ووحدة قياسه الهنرى، ويرمز لها بالرمز (H) .

في الشكل ٢ - ٥١ نفترض أن مساحة المقطع هي $A(m^2)$ وطول المسار المغناطيسي (m) والنفاذية $\mu(H/m)$. إذا كانت النفاذية μ ثابتة فإن الفيض المغناطيسي يتناسب مع التيار، ويمكن استخدام المعادلة (2-32) للحصول على المعادلة الآتية :

$$N_2 \phi = M I_1 \quad (2-33)$$

وبناء على المعادلات (2-15) و (2-16) يمكن استنتاج مايلي :

$$\phi = BA = \mu H A = \frac{\mu N_1 I_1 A}{l} \quad (Wb) \quad (2-34)$$

وهكذا فإن معامل الحث المتبادل M يمكن التعبير عنه بالمعادلة الآتية المستنتجة من المعادلات (2-33) و (2-34).

$$L_1 = \frac{N_1 \phi_1}{I_1} \text{ (H)} , M = \frac{N_2 \phi_1}{I_1} = \frac{N_2}{N_1} L_1 \text{ (H)} \quad (2-36)$$

عند مرور التيار $I_2(A)$ في الملف الثانوي S يتولد الفيض المغناطيسي $\phi_2(Wb)$ ونستنتج المعادلة الآتية .

$$L_2 = \frac{N_2 \phi_2}{I_2} \text{ (H)} , M = \frac{N_1 \phi_2}{I_2} = \frac{N_1}{N_2} L_2 \text{ (H)} \quad (2-37)$$

ونتيجة لذلك يمكن استنتاج المعادلة التالية من المعادلات (2-36) , (2-37) .

$$M^2 = L_1 L_2$$

$$M = \sqrt{L_1 L_2} \quad (2-38)$$

في الواقع تكون قيمة M أقل من تلك المعطاة في المعادلة (2-38) نتيجة لتسرب الفيض. أي إن الفيض المغناطيسي يتسرب من القلب الحديدي لكل من الملفين، ويمكن كتابة M في هذه الحالة كما يلي :

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} \quad (2-39)$$

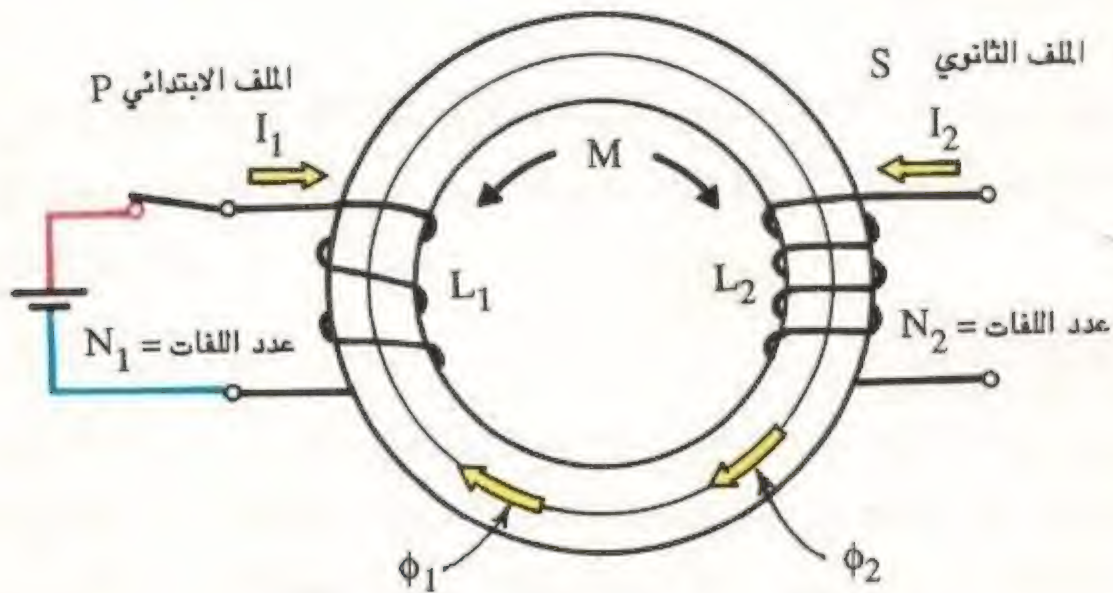
حيث k هي معامل الربط الذي يعبر عن درجة ربط الفيض المغناطيسي بين الملفين. وتتراوح قيمة k بين الصفر والواحد ($0 < k \leq 1$) وهي تساوي الواحد عند عدم وجود تسرب للفيض وزيادة تسرب الفيض تعنى تناقص قيمة k . يتضح من المعادلة (2-39) أن معامل الحث المتبادل M (H) يتناسب مع قيمة k عند ثبات قيمة كل من $L_1(H)$, $L_2(H)$.

سؤال ١٦

في الشكل ٢ - ٥١ عدد لفات الملف الابتدائي 100 وعدد لفات الملف الثانوي 1000 . عند مرور تيار قيمته 5 أمبير في الملف الابتدائي حدث فيض مغناطيسي قيمته 5×10^{-3} ويبر . احسب معامل الحث المتبادل .

٢ - ٦ - ٤ معامل الحث الذاتي ومعامل الحث المتبادل

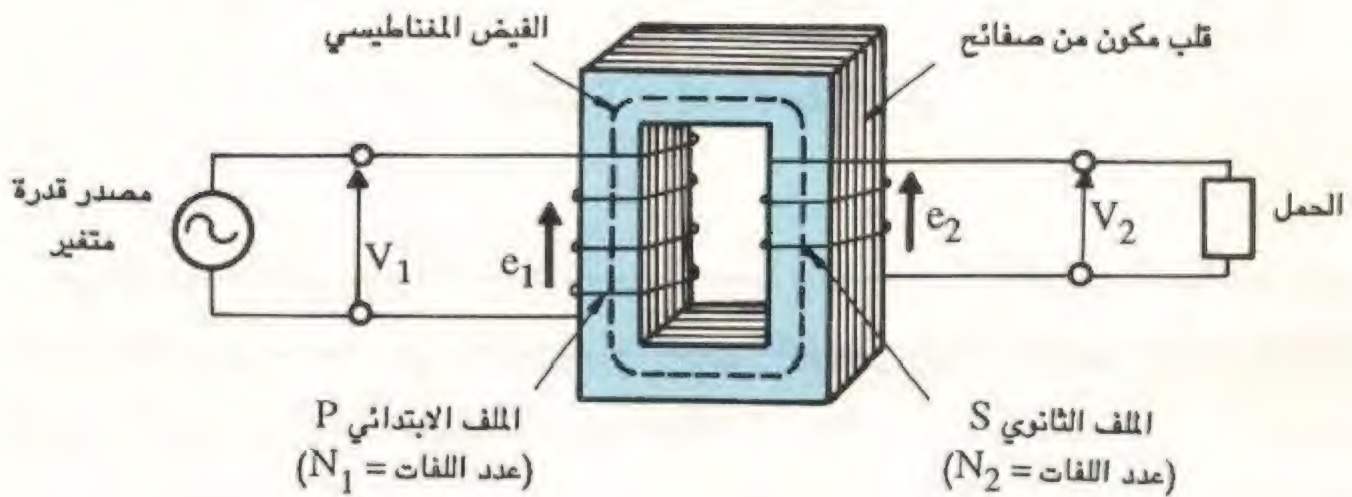
في الشكل ٢ - ٥٢ نفترض أن معامل الحث الذاتي للملف الابتدائي P هو $L_1 (H)$ ومعامل الحث الذاتي للملف الثانوي S هو $L_2 (H)$ ومعامل الحث المتبادل بين الملفين هو $M(H)$. عند مرور التيار $I_1 (A)$ في الملف الابتدائي P يتولد فيض مغناطيسي $\phi_1 (Wb)$ ويمكن استنتاج ماييلي من المعادلات (2-27) ، (2-35) .



الشكل ٢ - ٥٢ معامل الربط

٢ - ٦ - ٥ مبدأ عمل المحول (الترانسفورمر) Transformer

المحول هو جهاز لتغيير قيمة التيار المتغير أو الجهد المتغير ، ويبين الشكل ٢-٥٣ أن المحول يتكون من ملفين P ، S ملفوفين حول قلب مكون من صفائح لها شكل الهيكل الخارجي للمحول . يتصل الملف P بمصدر التيار المتغير وهو الملف الابتدائي ويتصل الملف S بالحمل وهو الملف الثانوي .



الشكل رقم ٢ - ٥٣ مبدأ عمل المحول

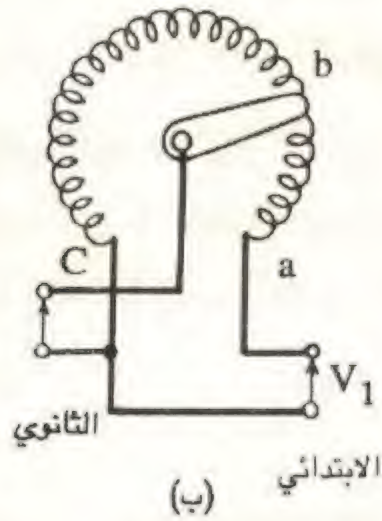
أ - المحول الذاتي ومحول التسرب

Autotransformer and leakage transformer

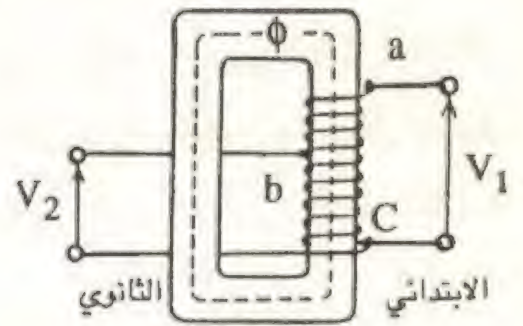
يبين الشكل ٢ - ٥٤ (أ) أن المحول الذاتي يتكون من ملف مفرد . الجزء (a c) من الملف يعمل بوصفه ملفاً ابتدائياً ، أما الجزء (b c) فيعمل بوصفه ملفاً ثانوياً . ويستخدم المحول الذاتي في منظم الجهد المنزلق كما في الشكل ٢ - ٥٤ (ب) والشكل ٢-٥٤ (ج) حيث إنه يحتوي على لفات أقل وقيمة أقل لتسرب الفيض وكفاءة أفضل .



(ج)



(ب)

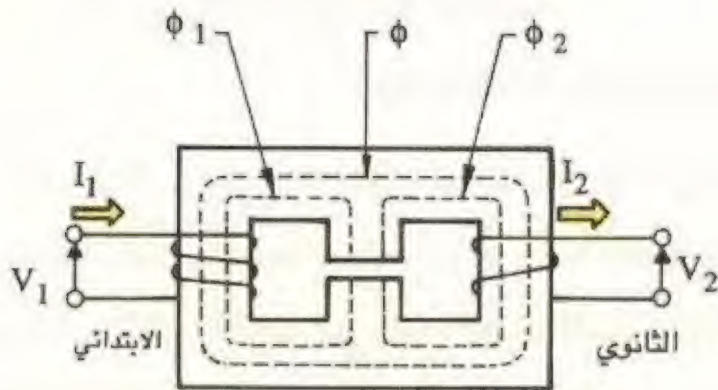


(ا)

الشكل ٢ - ٥٤ المحول الذاتي

في المحول العادي يجب ألا يحدث تسرب للفيض . وهناك نوع آخر من المحولات يسمى محول التسرب يستخدم في ماكينة لحام القوس الكهربائي ولوحات النيون ، يسمح تركيبه بتسرب الفيض من القلب الحديدي كما في الشكل ٢ - ٥٥ .

وعند زيادة التيار المار في الحمل يزيد فيض التسرب ϕ_1 ، ϕ_2 وتقل القوة الدافعة الكهربائية الحثية المتولدة في الملف الثانوي ويقل الجهد على الملف الثانوي V_2 (V) مما ينتج عنه ثبات قيمة التيار الثانوي I_2 (A) . وهكذا فإن هذا المحول يسمى محول التيار الثابت .



الشكل ٢ - ٥٥ محول التسرب

عند توصيل التيار المتغير الى الملف الابتدائي يمر التيار المتغير مع وجود تموجات مستمرة . ولهذا يتغير الفيض المغناطيسي Φ في القلب الحديدي، وتتولد قوة دافعة كهربائية في الملفات S, P عن طريق الحث الكهرومغناطيسي . إذا كان عدد لفات الملف الابتدائي N_1 وعدد لفات الملف الثانوي N_2 فإن القوى الدافعة الكهربائية المتولدة بالحث $e_1(V)$ $e_2(V)$ تكون كما يلي :

$$e_1 = -N_1 \frac{\Delta \phi}{\Delta t} (V) , \quad e_2 = -N_2 \frac{\Delta \phi}{\Delta t} (V) \quad (2-40)$$

لنفترض أن الجهد الطرفي للملف الابتدائي $V_1(V)$ والجهد الطرفي للملف الثانوي $V_2(V)$ وكان :

$$e_1 \approx V_1 , \quad e_2 \approx V_2$$

نحصل على العلاقة الآتية :

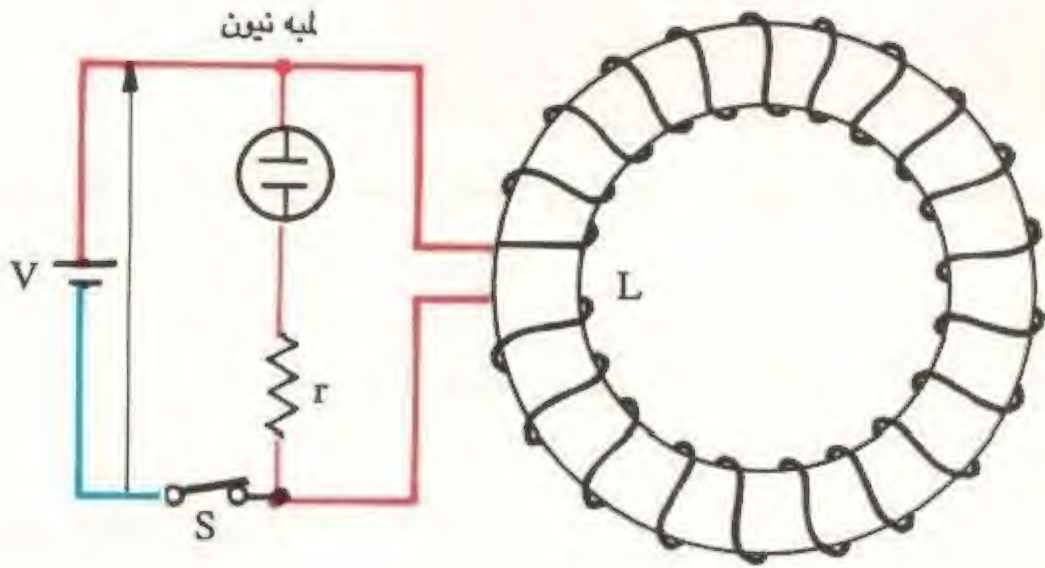
$$\frac{V_1}{V_2} \approx \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2-41)$$

في المعادلة (2-41) القيمة (a) هي نسبة لفات المحول ، والاختيار المناسب لهذه القيمة يتيح إمكانية تغيير قيمة التيار بحرية .

وحيالاً يتم توليد وإرسال وتوزيع القدرة الكهربائية في العالم في معظم الأحيان باستخدام التيار المتغير ، ويرجع ذلك إلى أن المحول يمكنه رفع وخفض الجهد بسهولة . ودور المحرك دور مهم ، وتستخدم المحولات على نطاق واسع ابتداءً من المحولات ذات السعة الكبيرة لمعالجة القدرة في محطات توليد الكهرباء والمحطات الفرعية وانتهاءً بالمحولات ذات السعة الصغيرة للأجهزة الإلكترونية المنزلية والأدوات الإلكترونية المختلفة وأدوات القياسات .

٢ - ٦ - ٦ الطاقة المخزنة في ملف Energy stored in coil

يبين الشكل ٢ - ٥٦ أن اللبنة النيون لاتضيء إذا كان المفتاح S مغلقاً مع وجود مصدر قدرة له جهد صغير V ولكنها تضيء عند لحظة فتح المفتاح S. ويرجع ذلك إلى أنه عند لحظة فتح المفتاح S تقوم الطاقة الكبيرة المخزنة في الملف L بالتفريغ لحظياً، الطاقة المخزنة في ملف تسمى الطاقة الكهرومغناطيسية .



الشكل ٢ - ٥٦ الطاقة الكهرومغناطيسية

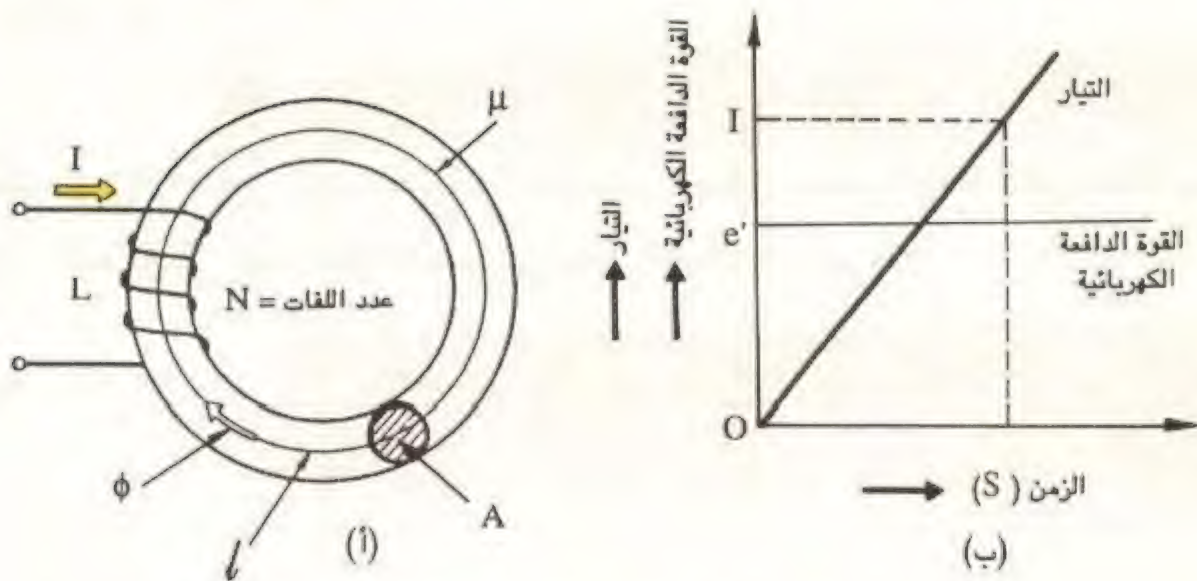
في الشكل ٢ - ٥٧ (أ) نفترض أن التيار المار في ملف له معامل حث ذاتي L (H) يزيد بصورة خطية مع الزمن كما في الشكل ٢ - ٥٧ (ب) فيصل إلى القيمة I (A) بعد زمن قدرة t (S). تكون قيمة القوة الدافعة الكهربائية \mathcal{E} (V) في الملف المستنتجة من المعادلة (2-24) كما يلي :

$$\mathcal{E} = |\mathcal{E}| = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = L \frac{I}{t} \quad (\text{V})$$

نفترض أن تيار الملف الابتدائي p هو $I_1(A)$ وتيار الملف الثانوي S هو $I_2(A)$ نحصل على العلاقة :

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

القيمة $(1/a)$ هي نسبة تحويل التيار لهذا المحول .



الشكل ٢ - ٥٧ الطاقة المخزنة في ملف

نفترض أن متوسط قيمة التيار هي $I/2 [A]$ فيمكن حساب الطاقة الكهرومغناطيسية W الخارجة من مصدر القدرة خلال زمن $t (s)$ كما يلي :

$$W = \int_0^t \frac{I}{2} dt = L \cdot \frac{I}{t} \cdot \frac{It}{2} = \frac{1}{2} LI^2 (J) \quad (2-42)$$

تستخدم هذه الطاقة لتوليد المجال المغناطيسي $H (A/m)$ وتخزن في الملف .
لنفترض أن ملفاً عدد لفاته N لفة، يدخل في دائرة مغناطيسية طول المسار المغناطيسي

لها (m) ومساحة مقطع المسار المغناطيسي $A(m^2)$ والنفاذية $\mu (H/m)$. عند مرور التيار $I (A)$ يتولد فيض مغناطيسي $\Phi (Wb)$ ويمكن من المعادلات (2-10) ، (2-25) استنتاج ما يلي :

$$NI = H\ell, LI = N\Phi, B = \Phi / A \quad (T)$$

عند تعويض هذه المعادلات في المعادلة (2-42) يمكن حساب قيمة الطاقة الكهرومغناطيسية $W(J)$ كما يلي :

$$W = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} N \Phi I = \frac{1}{2} H \ell \Phi = \frac{1}{2} B H \ell A \quad (J) \quad (2-43)$$

يلاحظ أن (ℓA) هي حجم الدائرة المغناطيسية ، ويمكن حساب الطاقة الكهرومغناطيسية المخزنة في المجال المغناطيسي في وحدة الحجم كما يلي :

$$w = \frac{W}{\ell A} = \frac{1}{2} B H = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} \quad (J/m^3) \quad (2-44)$$

سؤال ١٧

يمر تيار قيمته 2 أمبير في ملف معامل الحث الذاتي له 500 ميلي هنري . احسب الطاقة الكهرومغناطيسية المخزنة في الملف .

سؤال ١٨

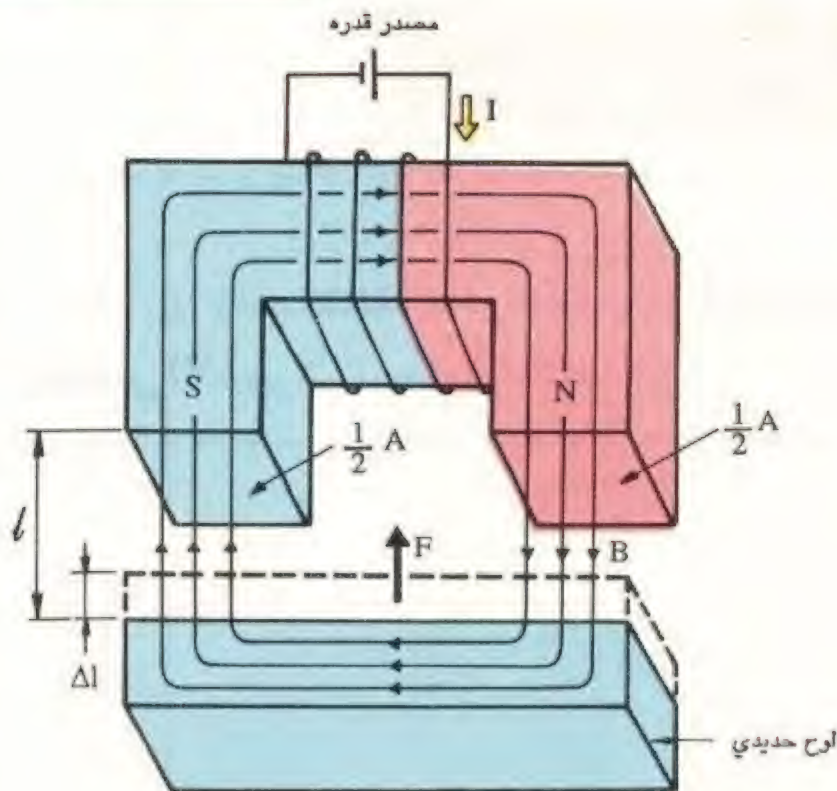
في الشكل ٢ - ٥٧ إذا كانت كثافة الفيض المغناطيسي 0.4 تسلا والنفاذية النسبية 500 . احسب الطاقة الكهرومغناطيسية المخزنة في 1 م٣ .

٢ - ٦ - ٧ قوة الجذب المغناطيسي Magnetic attraction

كما في الشكل ٢ - ٥٨ يمكن حساب القوة التي تؤثر على لوح حديدي موضوع بالقرب من مغناطيس، والتي تجعل اللوح ينجذب إلى المغناطيس على أساس نظرية الطاقة الكهرومغناطيسية .

في الشكل ٢ - ٥٨ نفترض أن مساحة الفيض المغناطيسي المار هي $A(m^2)$ وكثافة الفيض المغناطيسي $B(T)$ والمسافة بين المغناطيس واللوح الحديدي (m) ونفاذية الهواء $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (H/m)$. فإن الطاقة الكهرومغناطيسية المخزنة في المجال المغناطيسي يمكن حسابها من المعادلة .

$$W = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} A \ell \quad (J) \quad (2 - 45)$$



الشكل ٢ - ٥٨ التجاذب المغناطيسي

نفترض أن اللوح الحديدي يتحرك مسافة Δl (m) نتيجة لقوة التجاذب F (N) فإن الطاقة المفقودة في المجال المغناطيسي لمسافة Δl (m) هي :

$$\Delta W = \frac{B^2}{2\mu_0} A \Delta l \quad (J)$$

وهذه تساوي قيمة الشغل $F \Delta l$ (J) المؤدى بواسطة قوة التجاذب . ولهذا فإن قوة التجاذب F (N) يمكن حسابها كما يلي :

$$F \Delta l = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} A \Delta l$$

$$F = \frac{1}{2} \frac{1}{\mu_0} B^2 A \quad (N) \quad (2 - 46)$$

أما قوة التجاذب f (N/m^2) المؤثرة على وحدة المساحة فتحسب كما يلي :

$$f = \frac{F}{A} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \quad (N/m^2) \quad (2 - 47)$$

سؤال ١٩

في الشكل ٢ - ٥٨ إذا كانت كثافة الفيض المغناطيسي 0.4 تسلا ، ومساحة توليد الفيض المغناطيسي 50 سم² . احسب قوة التجاذب .

تمارين

- ١ - إذا كانت قوة التجاذب بين قطبين مغناطيسيين البعد بينهما 10 سم هي 5 نيوتن وكانت شدة أحد القطبين 5×10^{-4} ويبر . احسب شدة القطب الآخر .
- ٢ - نفترض قياس شدة المجال المغناطيسي عند نقطة تبعد 30 سم من سلك خطي يمر به تيار وأن كثافة المجال المغناطيسي هي 5 A/m . احسب قيمة التيار .
- ٣ - يمر تيار قيمته 1 أمبير في ملف أسطواني نصف قطره 5 سم وعدد لفاته 10 ، احسب شدة المجال المغناطيسي عند مركز الملف .
- ٤ - ملف اسطواني رفيع عدد لفاته 800 لفة / متر ، وشدة المجال المغناطيسي داخله 4000 أمبير / متر . احسب التيار المار بالملف .
- ٥ - يمر تيار قيمته 3 أمبير في ملف حلقي متوسط نصف قطره 20 سم ، والعدد الكلي لللفاته 500 . احسب شدة المجال المغناطيسي داخل الملف .
- ٦ - قلب حديدي له شكل الإطار مصنوع من صلب السيليكون ، ومساحة مقطعه 3 سم² ، وطول المسار المغناطيسي 40 سم . احسب المقاومة المغناطيسية .
- ٧ - يمر تيار قيمته 0.2 أمبير في الإتجاه نفسه في موصلين متوازيين موضوعين في الهواء والمسافة بينهما 10 سم . احسب القوة المؤثرة على المتر الطولي من الموصل .
- ٨ - ملف عدد لفاته 80 ويتغير الفيض المغناطيسي الذي يتقاطع معه بمقدار 0.1 ويبر خلال مدة زمنية 0.2 ثانية . احسب قيمة القوة الكهرومغناطيسية المتولدة في الملف .
- ٩ - دائرة مغناطيسية مساحة مقطع المسار المغناطيسي بها 2 سم² ، وطول المسار المغناطيسي 36 سم ، وعدد لفات الملف 1200 لفة ، ومعامل الحث الذاتي 1 ميلي هنري . احسب النفاذية النسبية لهذه الدائرة المغناطيسية .

١٠ - محول عدد لفات الملف الابتدائي به 100 لفة ، وعدد لفات الملف الثانوى 200 لفة ومعامل الحث المتبادل 100 ميللى هنري . احسب معامل الحث المتبادل إذا أصبح عدد اللفات في الملفات 300 ، 500 .

١١ - إذا كان معامل الحث الذاتي للملف الابتدائي 30 ميللى هنري ومعامل الحث الذاتي للملف الثانوى 240 ميللى هنري ومعامل الربط k هو 0.1 . احسب معامل الحث المتبادل .

١٢ - إذا زادت قيمة التيار المار في ملف إلى ثلاثة أضعافه ، فكم مرة تزيد الطاقة الكهرومغناطيسية المخزنة فيه ؟

الفصل الثالث

الكهرباء الساكنة

Static electricity

عند ذلك جسم ما تتولد الكهرباء، وتلك ظاهرة معروفة جداً. هذا النوع من الكهرباء له شحنة كهربائية تستقر على سطح الجسم وتسمى الكهرباء الساكنة .

وعند توصيل قطبي بطارية إلى لوحين معدنيين يواجه أحدهما الآخر وبينهما عازل فإن الشحنة الكهربائية المخزنة عليهما تتناسب مع جهد البطارية . ويسمى هذا التركيب بالمكثف ويستخدم في أجهزة الحاسب الآلي وأجهزة كهربائية أخرى .

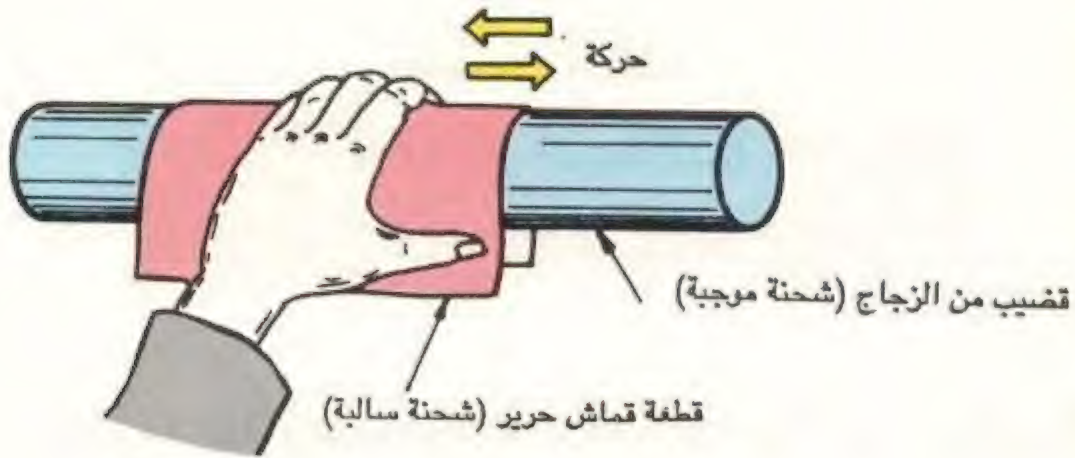
في الفصل الأول تمت معالجة حركة الشحنة أو التيار، وعلى النقيض من ذلك ففي هذا الفصل ستنم معالجة الشحنة المخزنة والشحنة غير المتحركة عن طريق علاقتها بالمكثف والتفريغ .

الموضوعات المعالجة في هذا الفصل لها علاقة قريبة بالمغناطيسية التي تمت دراستها في الفصل الثاني ، وإن دراسة الاختلافات بين هذين الفصلين سوف تساعدك لفهم هذا الفصل .

٣ - ١ كهرباء الاحتكاك Frictional electricity وقانون كولوم

٣ - ١ - ١ التكهرب Electrification

كما هو مبين بالشكل ٣ - ١ ، عندما يدلك قضيب من الزجاج بقطعة قماش من الحرير ، فإن كل من المادتين يحدث بها كهرباء تجذب رقائق الورق.



الشكل ٣ - ١ التكهرب

تسمى ظاهرة حدوث الكهرباء بذلك الجسم « التكهرب » ويسمى الجسم المتكهرب بالجسم المشحون . وتخزن الكهرباء في الجسم المشحون المعزول ، أي إن الشحنة الكهربائية لا تتحرك . وتسمى الكهرباء غير المتحركة « بالكهرباء الساكنة » .

يسبب ذلك جسمين مختلفين شحنة موجبة في أحد الجسمين وشحنة سالبة في الآخر . هذه الحقائق تشير إلى أن الشحنة الكهربائية نوعان ، شحنات موجبة وأخرى سالبة .

والشحنات التي لها الإشارة نفسها تتنافر ، والمختلفة الإشارة تتجاذب . وتسمى القوة المؤثرة بين الشحنات بقوة الكهرباء الساكنة .

٣ - ١ - ٢ قانون كولوم

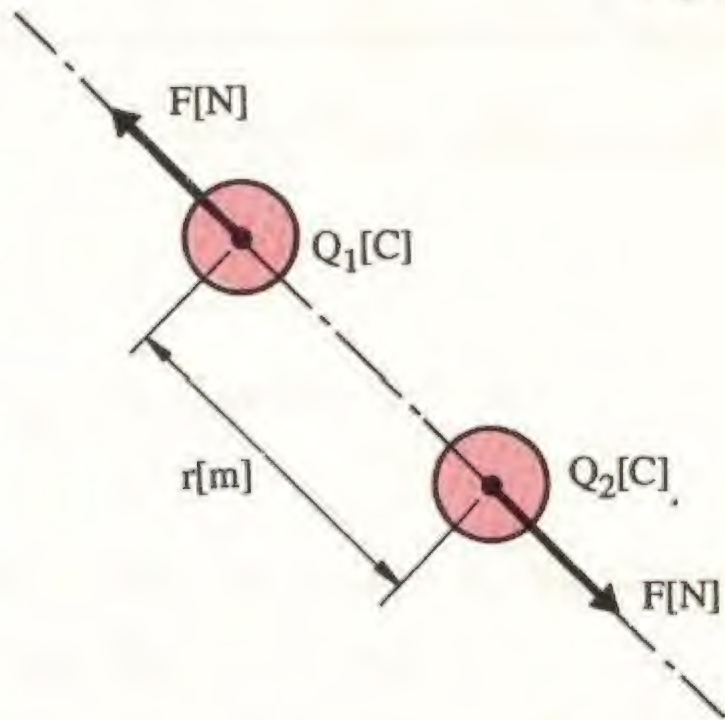
كما هو مبين بالشكل ٣ - ٢ ، عند وضع شحنتين Q_1 كولوم و Q_2 كولوم على مسافة r (متر) ، فإن مقدار قوة الكهرباء الساكنة F (نيوتن) المؤثرة بينهما يمكن التعبير عنها بالمعادلة الآتية :

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} (N)$$

(3-1)

واتجاهها يكون على خط مستقيم يمر بكل من الشحنتين .

ولهذا فإنه من المعروف أن قوة الكهرباء الساكنة بين شحنتين تتناسب طردياً مع حاصل ضرب الشحنتين ، وعكسياً مع مربع المسافة بينهما . وتعرف هذه العلاقة بقانون كولوم الخاص بالكهرباء الساكنة . عندما يعبر عن الشحنة (كولوم) بالموجب للشحنة الموجبة وبالسالب للشحنة السالبة ، فإن قوة الكهرباء الساكنة تكون تنافرية في الحالة الموجبة، وتكون تجاذبية في الحالة السالبة .



الشكل ٣ - ٢ قانون كولوم الخاص بالكهرباء الساكنة

الدلك الحر لمادتين من السلسلة التالية يحدث تهرباً موجباً في المادة الأسبق في السلسلة وسالباً في المتأخرة . تسمى هذه السلسلة بسلسلة الكهرباء الاحتكاكية : الفرو ، الصوف ، السيراميك ، الشمع الأحمر ، الزجاج ، الورق ، الحرير ، الكهرمان ، المعدن ، الصمغ ، الكبريت ، السيليولويد .

المادة	ϵ_r	المادة	ϵ_r	المادة	ϵ_r
البرافين	2.1 - 2.5	الفخار	5.7 - 6.8	راتينج فينولي	4.5 - 5.5
الزجاج	5.4 - 9.9	السيراميك	2.9 - 3.7	الماء	81
الميك	2.5 - 6.6	الايونيت	2.8	أكسيد التيتانيوم	83 - 183
الورق	2.0 - 2.6	السلينيوم	6.1 - 7.4		

الجدول ٣ - ١ السماحية النسبية ϵ_r Relative permeability

ثابت التناسب k يحسب من العلاقة : $k = \frac{1}{4\pi\epsilon}$

ϵ ترمز إلى السماحية ، والسماحية هي ثابت يحدد بواسطة وسط (العازل الكهربائي) الفراغ الموضوع فيه كل من الشحنتين .

نفترض أن سماحية الفراغ هي ϵ_0 فتكون سماحية وسط عام هي $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$

وتسمى ϵ_r بالسماحية النسبية ، ويبين الجدول ٣ - ١ السماحية النسبية .

وتتحول العلاقة (١ - ٣) إلى العلاقة التالية بالنسبة للفراغ والهواء :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \text{ (N)} \quad (3-2)$$

مثال ١

بفرض أن شحنتين موجبة وسالبة قيمتهما 3×10^{-6} كولوم موضوعتان على مسافة 5 سم في الفراغ . احسب قوة الكهرباء الساكنة المؤثرة بينهما .

الحل :

عوض عن $Q_1 = 3 \times 10^{-6} \text{ C}$ و $Q_2 = -3 \times 10^{-6} \text{ C}$ و $r = 0.05 \text{ m}$

في العلاقة (3-2) تحصل على :

$$F = -9 \times 10^9 \times \frac{3 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^{-6}}{0.05^2} = \frac{-81 \times 10^{-3}}{2.5 \times 10^{-3}} = -32.4 \text{ N}$$

سؤال ١

على فرض أن شحنتين قيمتهما $Q_1 = 1 \times 10^{-6} \text{ C}$ و $Q_2 = 5 \times 10^{-6} \text{ C}$ وضعتا في الفراغ، والمسافة بينهما 10 سم . احسب القوة المؤثرة بينهما .

٣ - ٢ المجال الكهربائي وخطوط القوى الكهربائية

٣ - ٢ - ١ حث الكهرباء الساكنة وحجب الكهرباء الساكنة

لقد وجدت في الكهرباء الساكنة الظاهرة نفسها التي وجدت في الحث المغناطيسي المعالج في الفصل الثاني .

اذ أنه كما هو مبين بالشكل ٣ - ٣ ، عندما يحرك موصل A مكهرب بشحنة موجبة في اتجاه موصل B معزول ، فإنه يحدث شحنة سالبة في الموصل B في الجزء القريب من الموصل A وشحنة موجبة في الجزء البعيد من الموصل A . وتحدث هذه الظاهرة بتحريك

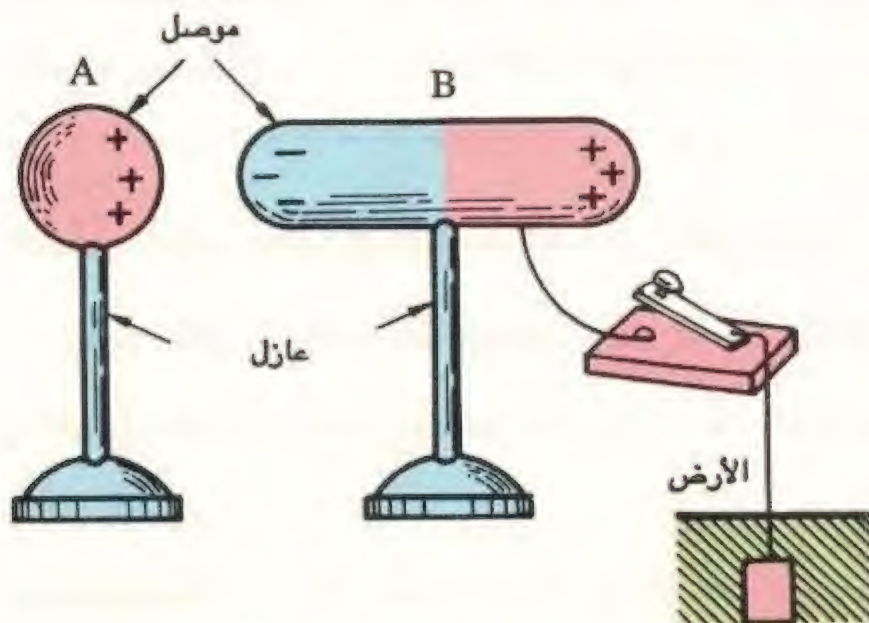
الشحنات الموجبة والسالبة الموزعة بانتظام في الموصل B إلى نهايات الموصل B تحت تأثير التجاذب وتتنافر مع شحنة الموصل A .

* على الرغم من أن هذه المادة عازلة ولا تمرر التيار الكهربائي ، فهي تولد وتخزن الشحنة الكهربائية، ومن هنا سميت العازل الكهربائي .

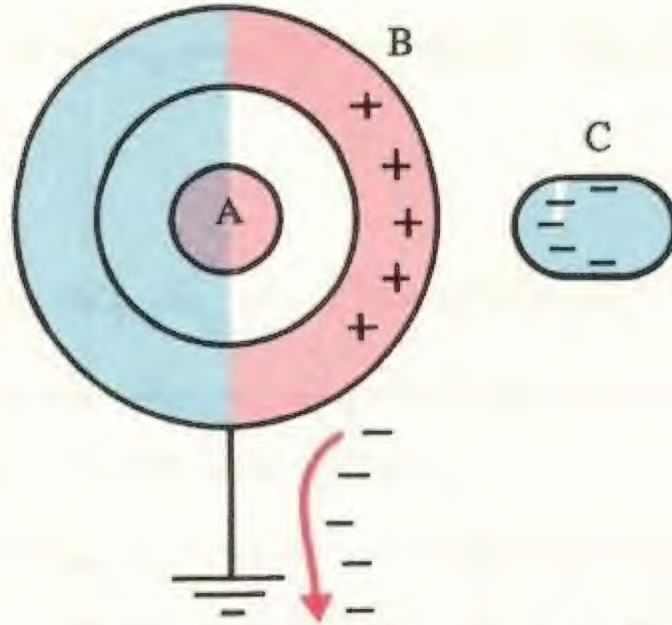
** سماحية الفراغ ϵ_0 . تعطى بالقيمة $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

وبالتفصيل $8.85487817 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ونظرياً، تعطى ϵ_0 بالعلاقة $\epsilon_0 = 10^7 / 4\pi C^2$ ، حيث C هي سرعة الضوء في الفراغ . وتكون $\epsilon_r = 1$ في الفراغ وتقريباً 1 في الهواء .

وسوف ندرس الوحدة الفاراد (F) فيما بعد .



الشكل ٣ - ٣ حث الكهرباء الساكنة



الشكل ٣ - ٤ حجب الكهرباء الساكنة

تسمى هذه الظاهرة حث الكهرباء الساكنة . وعندما يحرك الجسم المشحون A بعيداً عن الموصل B ، فإن B يعود إلى حالة عدم التكهرب .

وعندما يوصل الموصل B إلى الأرض بواسطة سلك توصيل (هذه العملية تسمى بالتأريض) كما بالشكل ٣ - ٣ ، فإن الشحنة السالبة الموجودة في الموصل B تبقى تحت تأثير جذب الشحنة الموجبة على الموصل A بينما تهرب الشحنة الموجبة على الموصل B إلى الأرض خلال السلك . وهنا ، عندما يزال السلك ويحرك الجسم المشحون A بعيداً فإن الشحنة السالبة فقط تبقى على الموصل B وتوزع بانتظام .

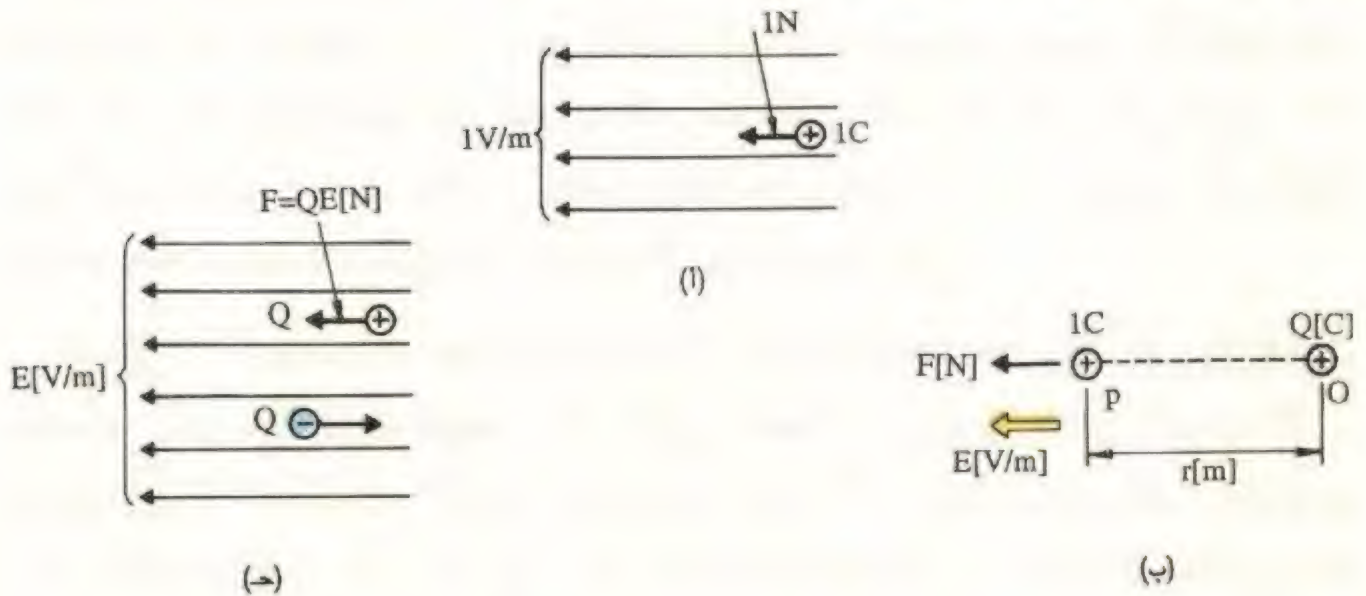
الشكل ٣ - ٤ يوضح أنه عندما يغطي موصل A بموصل فارغ مؤرض B ؛ وإذا قرب جسم مشحون C تجاه الموصل B ، تتكون شحنات موجبة تترك على الموصل B ، وتتحرك الشحنة السالبة إلى الأرض ، ولهذا فإن الموصل A الموجود داخل الجزء الفارغ من B لا يتأثر بالموصل C . هذا هو حجب الكهرباء الساكنة ، ويحدث مثل هذا في حالة ما إذا كان A هو الجسم المشحون و C هو الموصل .

يستخدم الحجب المغناطيسي بصورة واسعة لمنع حث الكهرباء الساكنة على الأجهزة الإلكترونية .

٣ - ٢ - ٢ المجال الكهربائي وشدة المجال الكهربائي

تستقبل الشحنة الموضوعة بالقرب من جسم مشحون قوة كهرباء ساكنة ، ويسمى الفراغ الذي تؤثر فيه قوة الكهرباء الساكنة بالمجال الكهربائي .

يعبر عن شدة المجال الكهربائي * واتجاهه بمقدار اتجاه قوة الكهرباء الساكنة المؤثرة على شحنة موجبة قيمتها 1 كولوم موضوعة في المجال الكهربائي كما هو مبين بالشكل ٣ - ٥ (أ) . ووحدة شدة المجال الكهربائي هي فولت لكل متر ، ويرمز لها V/m في مجال كهربائي شدته 1 فولت / م ، وقوة كهربائية ساكنة قيمتها 1 نيوتن تؤثر على شحنة موجبة قيمتها 1 كولوم . يتضح من الشكل ٣ - ٥ (ب) ، ويفرض أن الشحنات الكهربائية $Q(C)$ و $l(C)$ وضعت على مسافة $r(m)$ من بعضهما فان القوة F (نيوتن) المؤثرة بينهما يعبر عنها بالعلاقة التالية والناجمة من العلاقة (2 - 3) :



الشكل ٣ - ٥ شدة المجال الكهربائي

* شدة المجال الكهربائي هو متجه له مقدار واتجاه ، إلا إنه في هذا الكتاب نستخدم العبارة ، شدة المجال الكهربائي ، للتعبير ببساطة عن مقدار شدة المجال الكهربائي .

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \times 1}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{Q}{r^2} \text{ (N)} \quad (3-3)$$

ولهذا فإن شدة المجال الكهربائي $E(\text{V/m})$ المتولدة بواسطة الشحنة Q عند النقطة P تقدر بالعلاقة الآتية :

$$F = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = 9 \times 10^9 \frac{Q}{r^2} \text{ (V/m)} \quad (3-4)$$

كما يتضح من الشكل ٣ - ٥ (ج) ، بفرض أن الشحنة $Q(\text{C})$ وضعت في مجال كهربائي شدته $E(\text{v/m})$ ، فإن مقدار الكهرباء الساكنة $F(\text{N})$ المؤثرة على الشحنة يعبر عنها بالعلاقة التالية:

$$F = QE \text{ (N)} \quad (3-5)$$

واتجاه القوة هو اتجاه المجال الكهربائي في حالة الشحنة الموجبة لـ Q وهي في عكس اتجاه المجال الكهربائي في حالة الشحنة السالبة .

وكما هو معروف من العلاقة (3-4) ، تختلف شدة المجال الكهربائي المتولد حول شحنة كهربائية على حسب المسافة من الشحنة ، وعلى النقيض فإن المجال الكهربائي الذي له شدة متساوية في كل مكان يسمى المجال الكهربائي المتجانس .

مثال ٢

افترض شحنة قيمتها 5×10^{-6} كولوم في الهواء . احسب شدة المجال الكهربائي عند نقطة على بعد 30 سم من الشحنة .

الحل

عوض عن $Q = 5 \times 10^{-6} \text{ C}$ كولوم و $r = 0.3 \text{ m}$ في العلاقة (3-4)
فتحصل على :

$$E = 9 \times 10^9 \times \frac{5 \times 10^{-6}}{0.3^2} = \frac{45 \times 10^3}{9 \times 10^{-2}} = 5 \times 10^5 \text{ V/m}$$

السؤال ٢

احسب شدة المجال الكهربائي عند النقطة التي تؤثر عندها قوة مقدارها 0.05 نيوتن على شحنة قيمتها 0.1 كولوم .

٣ - ٢ - ٣ خط القوة الكهربائية والفيض الكهربائي

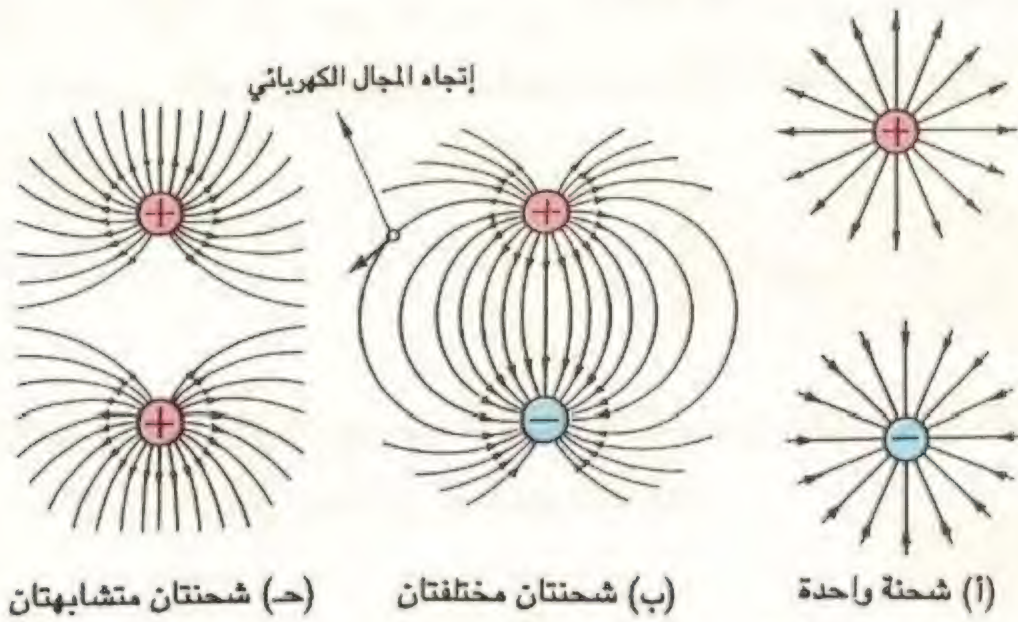
في الفصل الثاني ، تم تقديم خط القوة المغناطيسية والفيض المغناطيسي كخطوط خيالية للتعبير عن حالة المجال المغناطيسي . وكذلك في المجال الكهربائي ، تستخدم خطوط خيالية ، هي خطوط القوى الكهربائية والفيض الكهربائي ، كما هو موضح في الشكل ٣-٦ ، وخط القوة الكهربائية له الخواص التالية :

- (١) يخرج خط القوة الكهربائية من الشحنة الموجبة، ويدخل في الشحنة السالبة .
- (٢) خطوط القوى الكهربائية يكون عندها دائماً ميل للانكماش، وهي متنافرة فيما بينها مثل أحبال الصمغ .

(٣) خطوط القوى الكهربائي لا تتقاطع مع بعضها .

(٤) اتجاه الخط المماس لخطوط القوة الكهربائي عند نقطة مختارة بحرية يعبر عن اتجاه المجال الكهربائي عند هذه النقطة المعينة.

(٥) كثافة خطوط القوة الكهربائي في مستوى عمودي على المجال الكهربائي تعبر عن شدة المجال الكهربائي عند هذه النقطة .



الشكل ٣ - ٦ خطوط القوى الكهربائي وتوزيعها

(٦) وحدة الشحنة أي ± 1 كولوم تعطى وتستقبل $\frac{1}{\epsilon}$ من خطوط القوى الكهربائي

(٧) في موصل بنون قوة تيار ، فإن خطوط القوى الكهربائي تخرج وتأتي في اتجاه عمودي على سطح الموصل، ولا توجد خطوط قوى كهربائي داخل الموصل .

والجدير بالذكر أن الشحنتات المتماثلة تعطي أعداداً مختلفة من الخطوط على حسب الوسط. فعلى سبيل المثال فإن شحنة قيمتها 1 كولوم تعطى خطوط قوى كهربائي عددها $\frac{1}{\epsilon_0}$ في الفراغ، وتعطي $\frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0}$ في وسط ذات سماحية نسبية ϵ_r . ولهذا فإن $\frac{1}{\epsilon_0}$ من خطوط القوى الكهربائي ينظر له كخط خيالي فردي أي فيض كهربائي وله وحدات كولوم (C) مثل وحدات الشحنة .

افترض شحنة Q (C) موجودة في مركز كرة نصف قطرها r (m) ، كما هو مبين بالشكل ٣ - ٧ ، وشدة المجال الكهربائي على سطح الكرة E (V/m) يعبر عنها بالعلاقة :

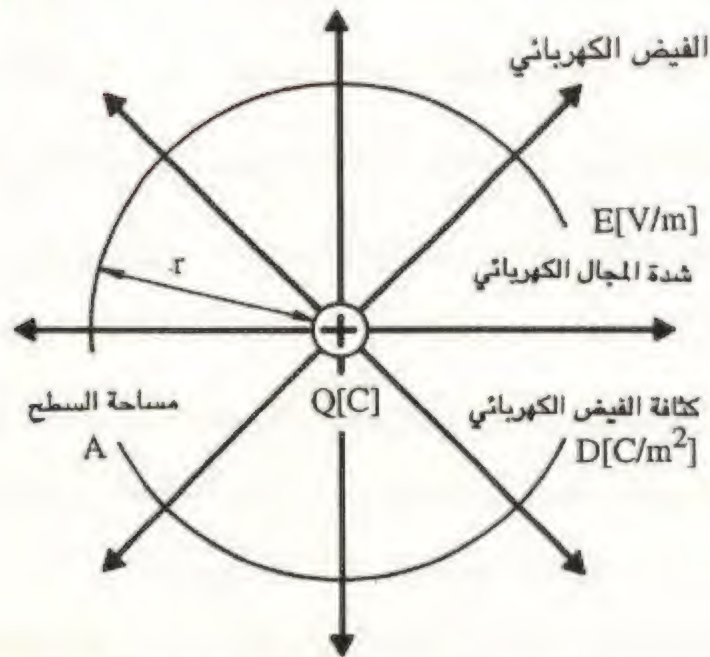
$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} \text{ (V/m)} \quad (3-6)$$

تشع الشحنة Q (C) فيضاً كهربائياً مقداره Q (C) ونفترض أن مساحة سطح الكرة A (m²) ، والفيض الكهربائي لكل وحدة مساحات، أي كثافة الفيض الكهربائي D (C/m²) يعبر عنه بالعلاقة :

$$D = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{4\pi r^2} \text{ (C/m}^2\text{)} \quad (3-7)$$

ولهذا وجدت العلاقة الآتية* بين شدة المجال الكهربائي E (V/m) وكثافة الفيض الكهربائي D (C/m²) في وسط ذي سماحية ϵ (F/m) .

$$D = \epsilon E \text{ (C/m}^2\text{)} \quad (3-8)$$

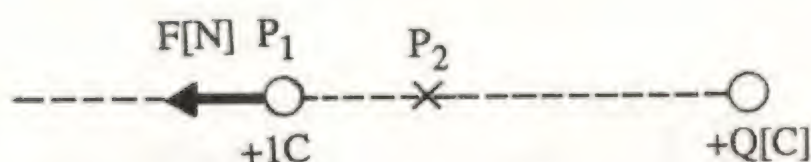


الشكل ٣ - ٧ شدة المجال الكهربائي وكثافة الفيض الكهربائي .

* شدة المجال الكهربائي $E(V/m)$ هي كثافة خطوط القوى الكهربائية .
لهذا فإن العلاقة (3-8) تعني أن E هي النسبة بين كثافة الفيض الكهربائي
وكثافة خطوط القوى الكهربائية . ولهذا فإن العلاقة تتفق مع تناظر كل من الفيض
الكهربائي للشحنة Q و $\frac{Q}{\epsilon}$ من خطوط القوى الكهربائية .

٣ - ٢ - ٤ الجهد الكهربائي المطلق وفرق الجهد Potential difference

كما هو مبين بالشكل ٣ - ٨ ، نفترض أن قوة كهرباء ساكنة $F(N)$ تؤثر على شحنة
موجبة قيمتها $1(C)$ موضوعة عند النقطة p_1 في مجال كهربائي مولد عن طريق شحنة
كهربائية مقدارها $Q(C)$ ، وحركة الشحنة إلى النقطة p_2 في اتجاه معاكس لاتجاه القوة
 $F(N)$ يحتاج لإضافة قوة خارجية قيمتها $F(N)$ لعمل الشغل من الخارج .



الشكل ٣ - ٨ الجهد الكهربائي وفرق الجهد .

الشغل الخارجى المطلوب لتحريك شحنة كهربائية بين نقطتين في عكس اتجاه المجال
الكهربائي هو فرق الجهد بين النقطتين . في المثال السابق ، النقطة p_2 لها جهد أعلى من
النقطة p_1 * .

يستخدم الفولت (V) بالنسبة لوحدات فرق الجهد.

ففرق الجهد الذى قيمته 1 فولت بين نقطتين معناه أنه يحتاج شغل قيمته 1 جول لتحريك

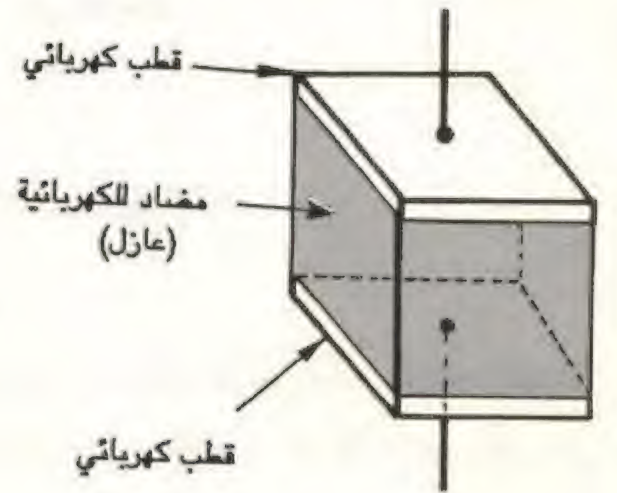
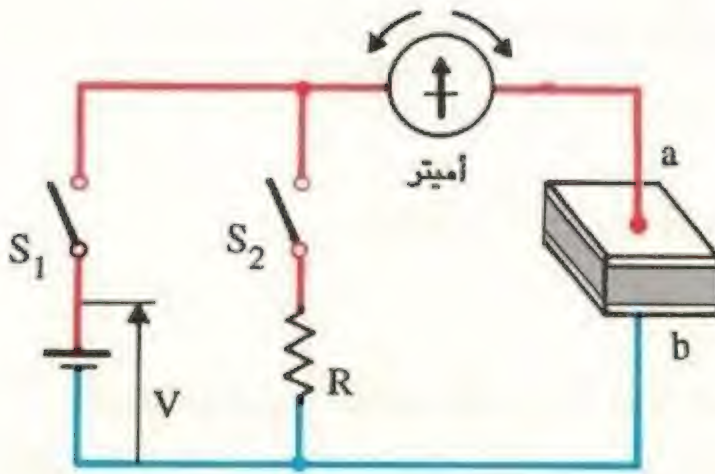
شحنة موجبة قيمتها 1 كولوم . ويعبر عن الجهد عند نقطة حرة في الفضاء بالفرق بين نقطة معينة عند مالا نهائية كأساس والنقطة الحرة . هذا الأساس هو عملياً الجهد صفر باستخدام الأرض له . ويستخدم القولت كوحدة للجهد .

يستخدم ميل الجهد (التفاضل) لفرق الجهد لكل 1 م طول ، بوحدة قولت/م . لهذا فإن ميل الجهد يساوى شدة المجال الكهربائي .

٣ - ٣ المكثف والسعة الكهروستاتيكية Electrostatic capacity

١ - ٣ - ٣ المكثف Capacitor

يتركب المكثف من عازل كهربائي موضوع بين لوحين معدنيين كقطبين موضوعين بحيث يوازي كل منهما الآخر كما نرى في الشكل ٣ - ٩ .



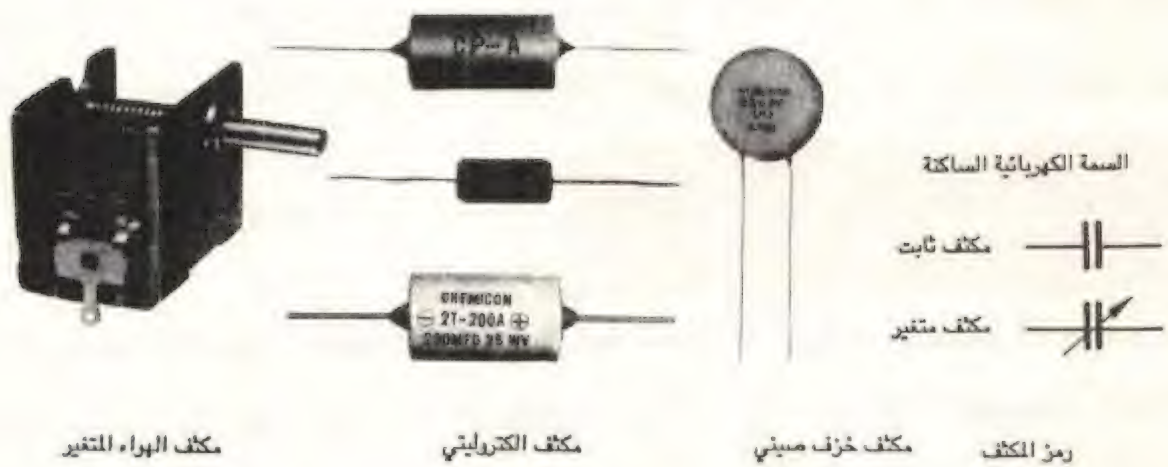
الشكل ٣ - ١٠ شحن وتفريغ المكثف .

الشكل ٣ - ٩ المكثف .

***الجهد الكهربائي وفرق الجهد المعالج في الفصل الأول مماثلين لما نقوم بمعالجته في هذا الفصل .**

في الشكل ٣ - ١٠ ، نفترض أننا سنقوم بوضع المفتاح S_1 في وضع التشغيل ونؤثر بجهد التيار المستمر الذي قيمته $V(V)$. من المتوقع أنه لن يسري تيار ، وذلك لوجود العازل بين a و b ، إلا أن تياراً يسري في لحظة تشغيل المفتاح ليتحرك مؤشر جهاز قياس التيار بعد ذلك ، عندما يوضع المفتاح S_1 في وضع التشغيل والمفتاح S_2 في وضع عدم التشغيل ، يسري تيار في اتجاه معاكس في لحظة عدم تشغيل S_2 . نتيجة لذلك ، فإن تسليط جهد يجعل المكثف يجمع شحنة كهربائية ، وهذا هو الشحن . وعلى النقيض ، تشغيل المفتاح S_2 يجعل الشحنة المجمعة تفرغ ، وهذا هو التفريغ .

يقسم المكثف على أساس نوع العازل الكهربائي إلى الأنواع الموضحة في الشكل ٣-١١ . والمكثف هو جهاز مهم لتكوين الدوائر الكهربائية مثل دوائر ضبط التردد ودوائر التنعيم ويستخدم المكثف لمنع الضوضاء ولتحسين معامل القدرة ** لمصابيح الفلورسنت ، وله وظائف مهمة أخرى بالنسبة للقدرة الكهربائية مثل تحسين مواصفات خطوط الإرسال وبدء المحرك .



الشكل ٣ - ١١ مكثفات مختلفة

* دائرة ضبط التردد هي دائرة رنين ، تستخدم لاختيار الموجة المرغوب فيها في جهاز استقبال لاسلكي . وسوف تعالج الدوائر الكهربائية مثل دوائر التنعيم في الفصل السادس.

** بالنسبة لمعامل القدرة ، ارجع إلى الفصل السادس من هذا الكتاب.

٣ - ٢ - السعة الكهروستاتيكية أو سعة الكهرباء الساكنة

الشحنة $Q(C)$ المخزنة في مكثف تتناسب مع الجهد $V(V)$ المسلط . نفترض أن ثابت التناسب هو C فيمكن كتابة العلاقة التالية :

$$Q = CV(C) , C = \frac{Q}{V} (F) \quad (3-9)$$

ثابت التناسب C هو سعة الكهرباء الساكنة لمكثف بوحدة الفاراد، ورمز الوحدة هو F . السعة التي قيمتها $1F$ هي سعة كهربائية ساكنة وفيها تخزن شحنة 1 كولوم بتسليط جهد قيمته 1 فولت . الوحدة F كبيرة جداً للاستخدام العملي، ولكن تستخدم على سبيل المثال الميكروفاراد (μF) والبيكوفاراد (pF) $[1\mu F = 10^{-6}F , 1pF = 10^{-12}F]$.

في الشكل ٣ - ١٢ ، افترض أن مساحة القطب هي $A(m^2)$ ، والمسافة بين القطبين هي $d(m)$ والسماحية النسبية للعازل هي ϵ_r ، وسعة الكهرباء الساكنة هي $C(F)$ ويعبر عنها بالعلاقة التالية :

$$C = \epsilon \frac{A}{d} = 8.85 \times 10^{-12} \epsilon_r \frac{A}{d} (F) \quad (3-10)$$

لهذا فإن سعة الكهرباء الساكنة تزداد بزيادة مساحة القطب ، وصغر المسافة بين القطبين واستخدام عازل ذي درجة سماحية كبيرة عملياً . تزداد السعة الكهربائية الساكنة بواسطة طرق مختلفة منها تنظيم ألواح معدنية بحيث تكون متوازية وتوصل ببعضها بالتبادل كقطب، ومنها وضع العازل بين فرخين من رقائق معدنية ثم تلف، ومنها تحسين العازل .

مثال ٣

احسب سعة الكهرياء الساكنة لمكثف له شحنة قيمتها 2×10^{-6} كولوم عند تأثير جهد قيمته 10 فولت .

الحل

$$C = \frac{2 \times 10^{-6}}{10} = 0.2 \times 10^{-6} \text{ F} = 0.2 \mu\text{F}$$

سؤال ٣

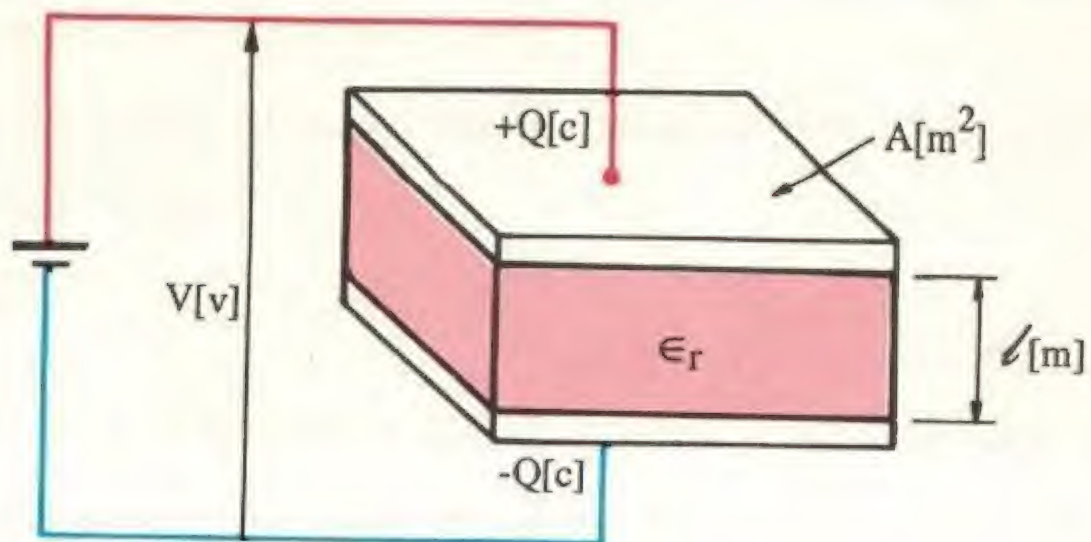
احسب الشحنة المخزنة في مكثف قيمته 10 ميكروفاراد عند تسليط جهد قيمته 20 فولت على المكثف .

٣ - ٣ - ٣ الطاقة المخزنة في المكثف Energy stored in capacitor

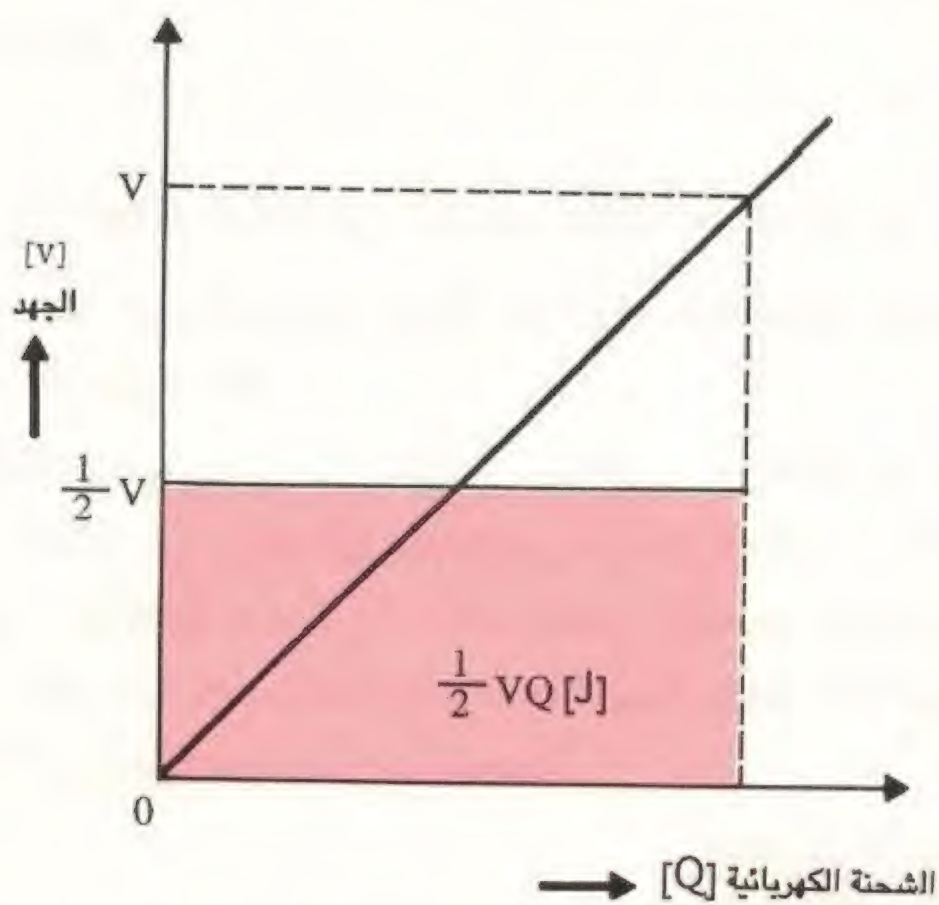
عند تسليط جهد على مكثف تعمل الشحنة الكهربائية المخزنة عند تفريغ الشحنة بالتحديد، ويكون المكثف المشحون له طاقة .

الشحنة $Q(C)$ المخزنة في مكثف تتناسب مع الجهد $V(V)$ المسلط على المكثف . وزيادة الجهد المسلط على مكثف ذي سعة كهرياء ساكنة $C(F)$ من $O(V)$ إلى $V(V)$ يجعل الشحنة $Q(C)$ كولوم تساوي $Q=CV(C)$ كولوم ؛ كما هو مبين بالشكل ٣ - ١٣ . وهذا يساوي تسليط جهد ثابت متوسط قيمته $V/2(V)$ يحرك شحنة $Q(C)$ كولوم . حينئذٍ، الطاقة $W(J)$ المخزنة في المكثف يعبر عنها بالعلاقة :

$$W = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 (J) \quad (3-11)$$



الشكل ٣ - ١٢ سعة الكهرباء الساكنة .



الشكل ٣ - ١٣ الطاقة المخزنة في مكثف

والآن ، بفرض أن مساحة اللوح في القطب هي $A(m^2)$ والمسافة بين القطبين هي $d(m)$ ، سماحية العازل هي $\epsilon (F/m)$ ، فإن شدة المجال الكهربائي في العازل تساوي $E(V/m)$ وكثافة السيل الكهربائي تساوي $D(C/m^2)$ ، $V=E \cdot d$ ، $Q=DA$ وعند التعويض بهذه القيم في العلاقة (11 - 3) نحصل على العلاقة :

$$W = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} ED \cdot A \text{ (J)} \quad (3-12)$$

تخزن هذه الطاقة في العازل داخل المكثف . A هو حجم العازل ، والطاقة $w(J/m^3)$ لكل وحدة حجم يعبر عنها بالعلاقة :

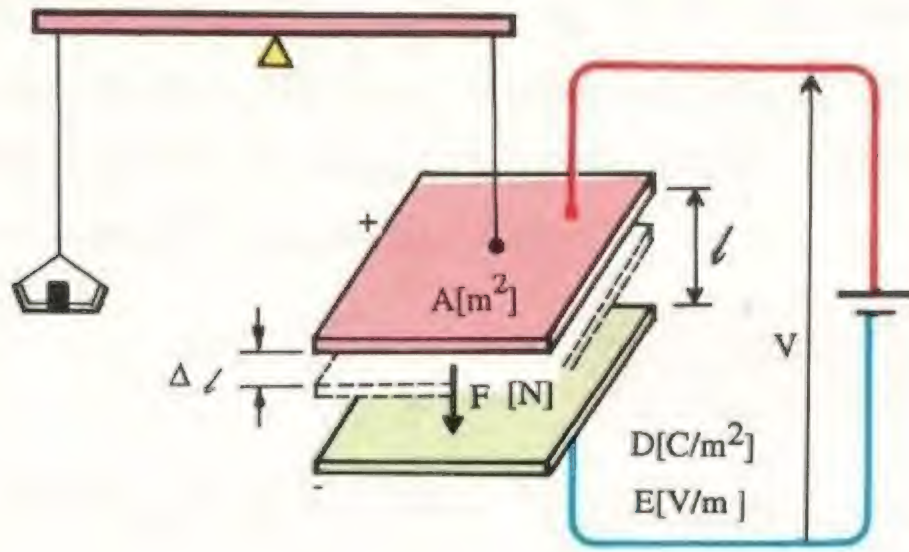
$$w = \frac{W}{A \cdot d} = \frac{1}{2} ED = \frac{1}{2} \epsilon E^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{D^2}{\epsilon} (J/m^3) \quad (3-13)$$

سؤال ٤

في الشكل ٣ - ١٢ ، نفترض أن الجهد يساوي 1000 فولت ، ومساحة القطب تساوي 50 سم^٢ ، والمسافة بين القطبين تساوي 20 مم ، والسماحية النسبية ϵ_r تساوي 8 ، احسب الطاقة المخزنة لكل 1 م^٣ .

٣ - ٣ - ٤ قوة التجاذب الكهروستاتيكية Electrostatic attractive force

كما يرى في الشكل ٣ - ١٤ ، تخزن الشحنة بتسليط جهد تيار مستمر على قطبي مكثف، وتؤثر القوة الكهربائية الساكنة على كل من القطبين .



الشكل ٣ - ١٤ قوة التجاذب الكهروستاتيكية

والآن ، بفرض أن قوة التجاذب $F(N)$ تحرك القطب لمسافة $\Delta (m)$ فإن الطاقة $\Delta W = 1/2 ED \cdot A \Delta (J)$ المؤثرة في المسافة Δ تقل على أساس العلاقة (3-12) .
في النهاية ، فإن هذه الطاقة تساوى الشغل $F \Delta (J)$ الناتج من قوة التجاذب ولهذا تستنتج العلاقة الآتية :

$$F \Delta = \frac{1}{2} ED \cdot A \Delta$$

ومنها نحصل على

$$F = \frac{1}{2} EDA (N) \quad (3-14)$$

بالإضافة إلى ذلك ، يعبر عن قوة التجاذب $f (N/m^2)$ لكل وحدة مساحات بالعلاقة الآتية :

$$f = \frac{F}{A} = \frac{1}{2} ED = \frac{1}{2} \epsilon E^2 (N/m^2) \quad (3-15)$$

بينما تكون $E = V/l$ (v/m) ، فإن العلاقة (3-15) تتحول إلى العلاقة الآتية :

$$f = \frac{1}{2} \frac{\epsilon}{l^2} V^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (3-16)$$

هذه القوة هي قوة التجاذب الكهروستاتيكية، وتستخدم في مقياس جهد الكهرباء الساكنة وماسك الأتربة الكهربائي .

سؤال ٥

في الشكل ٣ - ١٤ ، افترض أن الجهد 1000 فولت ، ومساحة القطب 20 سم² ، والمسافة بين القطبين 2 سم ، والسماحية تساوي سماحية الهواء ، $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ، احسب قوة التجاذب الكهروستاتيكية المؤثرة على القطبين .

٣ - ٤ توصيل المكثفات Connection of capacitors

ينقسم التوصيل الأساسي للمكثفات إلى توصيلات على التوازي وتوصيلات على التوالي . السعة الكهروستاتيكية الكلية للدائرة يعبر عنها بسعة كهروستاتيكية واحدة تسمى بالسعة الكهروستاتيكية المركبة مثلها مثل المقاومات.

٣ - ٤ - ١ التوصيل على التوازي Parallel connection

كما يتضح من الشكل ٣ - ١٥ (أ) تحسب السعة الكهروستاتيكية المركبة $C(F)$ في حالة توصيل مكثفات لها سعات كهروستاتيكية قيمتها $C_1(F)$ ، $C_2(F)$ ، $C_3(F)$ على التوازي . نفترض أن تسليط جهد $V(V)$ عبر النهايتين a و b ينتج عنه شحنات قيمتها $Q_1(C)$ ، $Q_2(C)$ ، $Q_3(C)$ مخزنة في كل مكثف ، فتنشأ العلاقة الآتية :

$$Q_1 = C_1 V(C) , Q_2 = C_2 V(C) , Q_3 = C_3 V(C) \quad (3-17)$$

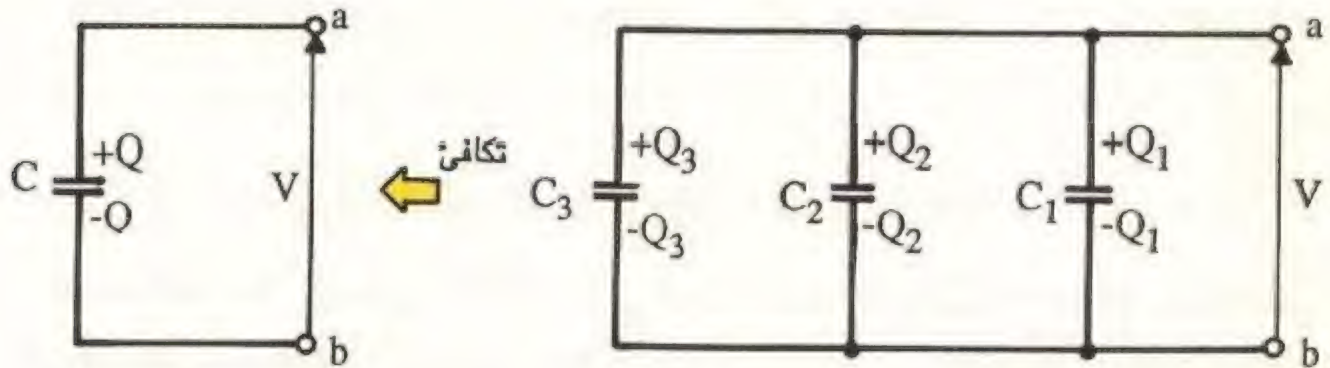
الشحنة الكلية $Q(C)$ عبر النهايتين a, b هي مجموع $Q_1(C), Q_2(C), Q_3(C)$ وتنتج العلاقة الآتية :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = (C_1 + C_2 + C_3) V (C) \quad (3-18)$$

ولهذا ، فإن السعة الكهروستاتيكية المركبة $C(F)$ المحسوبة على أساس الشكل ٣ - ١٥ (ب) يعبر عنها بالعلاقة :

$$C = \frac{Q}{V} = C_1 + C_2 + C_3 (F) \quad (3-19)$$

ومن ثم فإن السعة الكهروستاتيكية المركبة لدائرة مكثفات موصلة على التوازي تساوى مجموع السعات الكهروستاتيكية لكل مكثف .



الشكل ٣ - ١٥ توصيل المكثفات على التوازي

مثال ٤

على فرض أن جهداً قيمته 300 فولت يسلط على مكثفات موصلة على التوازي ذات سعات قيمتها 0.1 ميكروفاراد و 0.2 ميكروفاراد و 0.5 ميكروفاراد . احسب الشحنة الكلية المخزنة .

الحل

$$C = 0.1 + 0.2 + 0.5 = 0.8 \mu F \quad \text{من المعادلة (3-19) :}$$

$$Q = CV = 0.8 \times 10^{-6} \times 300 = 240 \times 10^{-6} C = 240 \mu C \quad \text{من المعادلة (3-18) :}$$

سؤال ٦

على فرض أن جهداً قيمته 100 فولت سلط على مكثفات متصلة على التوازي ذات سعات 2 ميكروفاراد و 3 ميكروفاراد و 4 ميكروفاراد. احسب الشحنة الكهربائية لكل مكثف والسعة الكهروستاتيكية المركبة .

٣ - ٤ - ٢ التوصيل على التوالي Series connection

السعة الكهروستاتيكية المركبة $C(F)$ تحسب لمكثفات موصلة على التوالي ذات سعات $C_1(F)$, $C_2(F)$, $C_3(F)$ كما هو مبين بالشكل ٣ - ١٦ (أ) كما يلي:

نفترض أن تسليط جهد قيمته $V(V)$ عبر النهايتين a , b يولد شحنة قيمتها $\pm Q(C)$ في القطبين المتصلين مباشرة بالنهايتين . كما هو مبين بالشكل ٣ - ١٦ (أ) ، تظهر شحنات قيمتها $+Q(C)$, $-Q(C)$ في قطب الوسط بواسطة حث الكهرباء الساكنة .

هنا نفترض أن الجهود المسلطة على المكثفات هي $V_1(V)$, $V_2(V)$, $V_3(V)$ ونحصل على العلاقة الآتية :

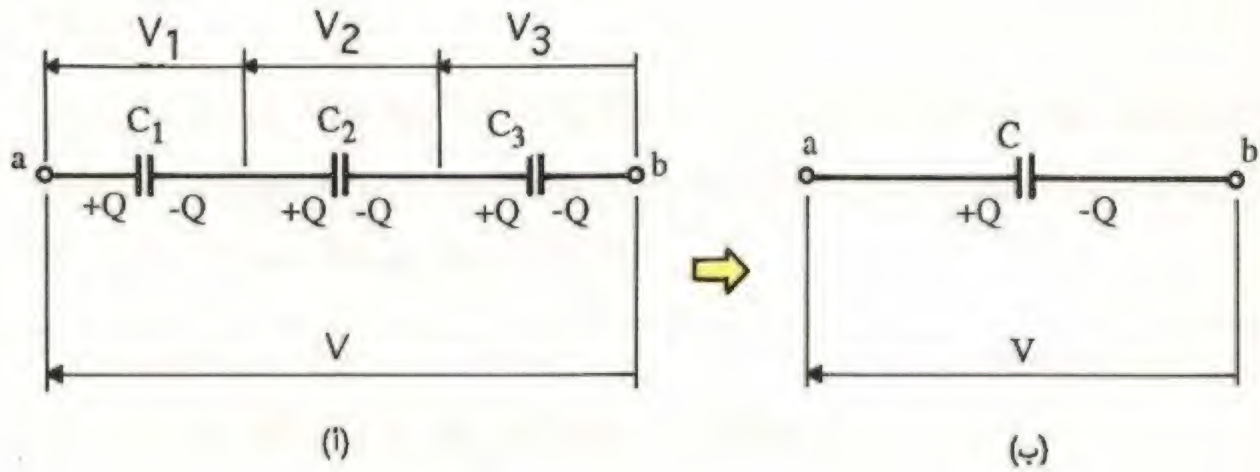
$$V_1 = \frac{Q}{C_1} (V) , V_2 = \frac{Q}{C_2} (V) , V_3 = \frac{Q}{C_3} (V) \quad (3-20)$$

ولكن مجموع الجهود يساوى جهد مصدر الطاقة؛ وهو ما يمكننا من أن نحصل على :

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) (V) \quad (3-21)$$

لهذا ، فإن العلاقة التالية تعبر عن السعة الكهروستاتيكية المركبة بناءً على الشكل ٣ - ١٦ (ب) .

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} (F) \quad (3-22)$$



الشكل ٣ - ١٦ توصيل المكثفات على التوالي

ونتيجة لذلك ، فإن السعة الكهروستاتيكية المركبة لدائرة موصلة على التوالي هي مجموع مقلوبات السعات الكهروستاتيكية لكل مكثف .

فيما يلي نحسب النسبة بين الجهود المسلطة على نهايتي كل مكثف في الشكل ٣-١٦ (أ) . من المعادلة (3-20) ، فنتنتج العلاقة الآتية :

$$V_1 : V_2 : V_3 = \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2} : \frac{1}{C_3}$$

ومن المعروف أن الجهد يتناسب عكسياً مع السعة الكهروستاتيكية . ولهذا فإن المكثف ذو السعة الكهروستاتيكية الكبيرة يستقبل جهداً صغيراً نسبياً ، والمكثف ذو السعة الصغيرة يستقبل جهداً كبيراً .

بالإضافة إلى ذلك ، فإن الجهد المسلط عبر النهايتين لكل مكثف يعبر عنه بالمعادلة الآتية بدلالة الجهد $V(V)$ المسلط على كل المكثفات .

$$V_1 = \frac{Q}{C_1} = \frac{CV}{C_1} = \frac{C}{C_1} V \quad (V)$$

$$V_2 = \frac{C}{C_2} V \quad (V), \quad V_3 = \frac{C}{C_3} V \quad (V)$$

} (3-23)

مثال هـ

على فرض أن جهداً قيمته 100 فولت سلط على مكثفات متصلة على التوالي ذات سعات قيمتها 1 ميكروفاراد و 4 ميكروفاراد و 8 ميكروفاراد . احسب السعة الكهروستاتيكية المركبة $C(F)$ والشحنة الكلية $Q(C)$ المخزنة . كذلك احسب الجهود $V_3(V)$, $V_2(V)$, $V_1(V)$ عبر نهايتي كل مكثف .

الحل

تبين المعادلة (3-22) السعة الكهروستاتيكية المركبة $C(\mu F)$ كما يلي .

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{8}} = \frac{1}{\frac{8+2+1}{8}} = \frac{8}{11} = 0.727 \mu F$$

وتبين المعادلة (3-22) الشحنة الكلية $Q(C)$.

$$Q = CV = 0.727 \times 10^{-6} \times 100 = 72.7 \times 10^{-6} C = 72.7 \mu C$$

ويحسب الجهد المسلط على نهايتي كل مكثف V_3 , V_2 , V_1 بالعلاقة (3-23) :

$$V_1 = \frac{Q}{C_1} = \frac{72.7}{1} = 72.7 V$$

$$V_2 = \frac{Q}{C_2} = \frac{72.7}{4} = 18.2 V$$

$$V_3 = \frac{Q}{C_3} = \frac{72.7}{8} = 9.1 V$$

سؤال ٧

على فرض أن جهداً قيمته 30 فولت سلط على مكثفات متصلة على التوالي ذات سعات 2 ميكروفاراد و 3 ميكروفاراد و 6 ميكروفاراد . احسب السعة الكهروستاتيكية المركبة والجهد على طرفي كل مكثف .

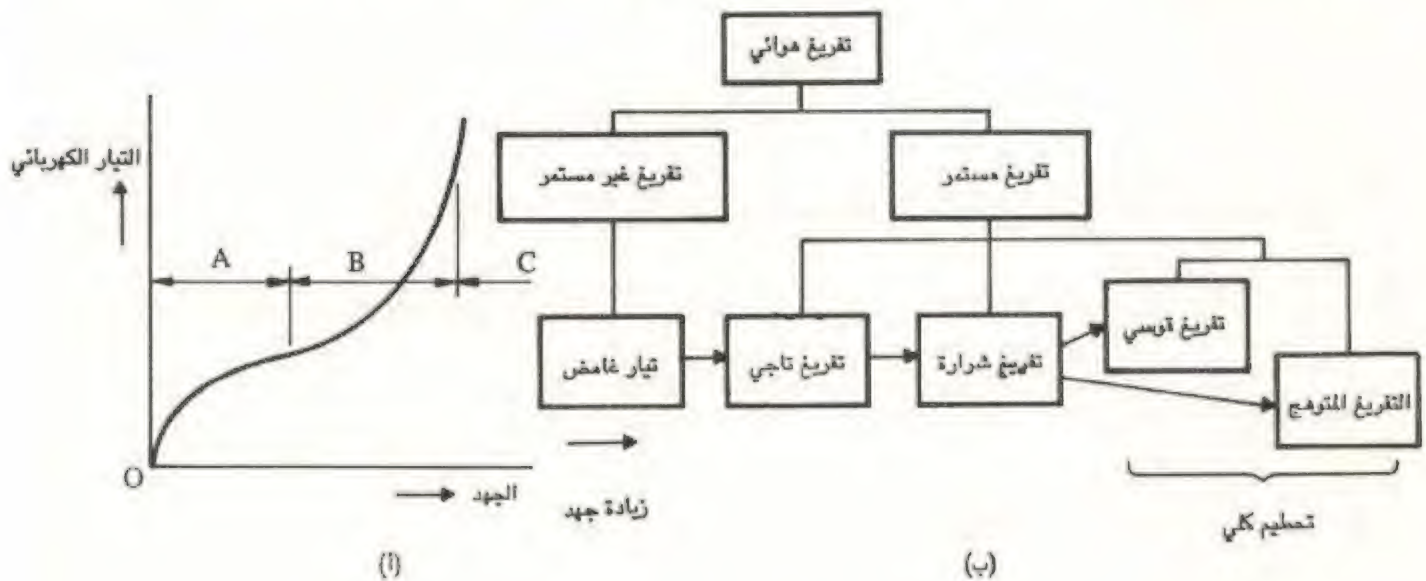
٣ - ٥ ظاهرة التفريغ

٣ - ٥ - ١ التفريغ Discharge

التفريغ هو ظاهرة تحرك الشحنة الكهربائية خلال الهواء والعوازل الأخرى . ويمنع العازل مرور التيار في الحالة العادية ، إلا إنه يسمح بمرور التيار تحت تأثير المجال الكهربائي الشديد .

انهيار العازل الكهربائي هو أن يصبح في حالة تفريغ عن طريق توقف عمل العازل .

في هذا البند سنركز على دراسة التفريغ الذي يحدث في الغاز أي التفريغ الهوائي .



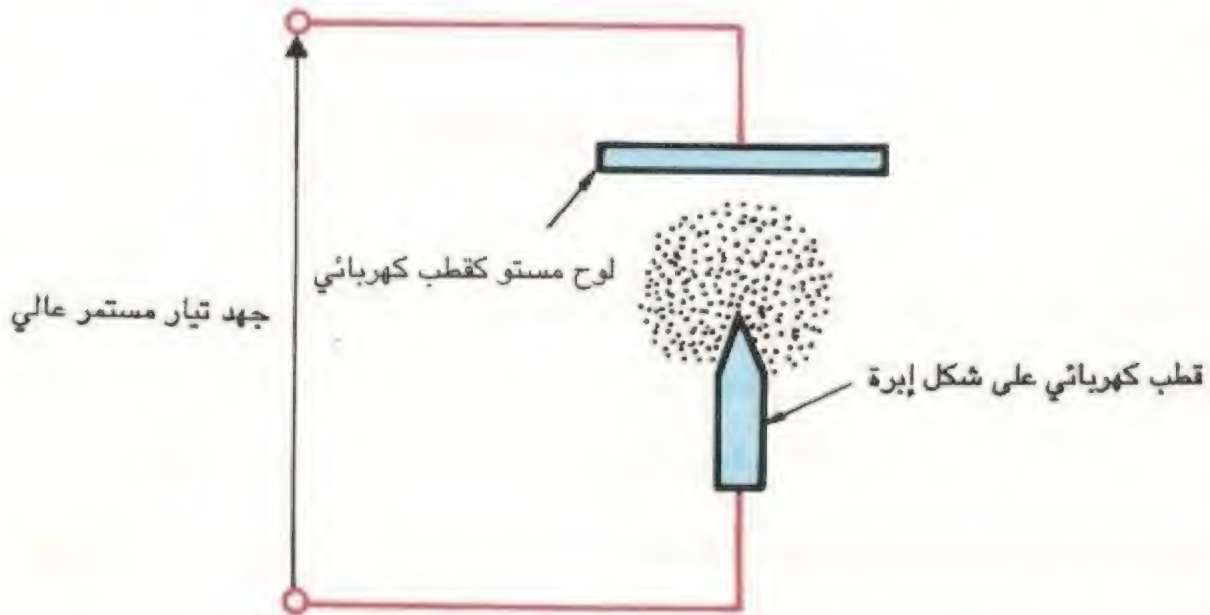
الشكل ٣ - ١٧ التفريغ الهوائي .

والآن ، نفترض أن زيادة الجهد المسلط على قطبين موضوعين في الهواء يزيد التيار تدريجياً كما يتضح من الشكل ٣ - ١٧ (أ) . في المنطقة A من الشكل ، فإن التيار يسري نتيجة لكمية صغيرة من الأيونات والإلكترونات الموجودة في الطبيعة . وفي المنطقة B ، تسبب الأيونات المتولدة مرور التيار بواسطة المجال الكهربائي المسلط . في المنطقة C ذات الجهد الكهربائي الشديد ، تنتج الأيونات باستمرار لتسبب سريان تيار تفريغ كبير مما ينتج عنه انهيار كلي .

يقسم التفريغ الهوائي إلى عدة أنواع كما هو مبين بالشكل ٣ - ١٧ (ب) .

١- التفريغ التاجي Corona Discharge

إن تسليط جهد تيار مستمر على قطب عبارة عن لوح، وقطب آخر عبارة عن إبرة يزيد المجال الكهربائي جداً حول رأس الإبرة فينهار عزل الهواء مما ينتج عنه التفريغ بالانتشار وحدث ضوءاء ضعيفة وضوء ضعيف ، وتسمى هذه الظاهرة بالتفريغ التاجي كما هو مبين بالشكل ٣ - ١٨ .



الشكل ٣ - ١٨ التفريغ التاجي

يحدث التفريغ التاجي في خطوط إرسال الجهد العالي . والفقد التاجي ، (أو فقد القدرة) بسبب التفريغ التاجي يعدّ مشكلة .

ب - تفريغ الشرارة Spark Discharge

في الشكل ٣ - ١٧ (أ) ، تؤدي زيادة الجهد للدخول في المنطقة C إلى زيادة عجلة الأيونات مما يؤدي إلى زيادة حادة في التيار. وفي النهاية، تبعث الأقطاب شرارات مع ضوضاء شديدة لعمل التفريغ . هذه الظاهرة هي تفريغ الشرارة . والرعد، (الظاهرة الطبيعية) هو في حقيقة الأمر تفريغ أيضاً .

تفريغ الشرارة هو ظاهرة مؤقتة تنتهي في وقت قصير ؛ ولو أنه استمر لوقت طويل ، فإنه يحدث بعد ذلك تفريغ متوهج وتفرغ قوسي .

وتحدد قيمة الجهد لتفريغ الشرارة بالمسافة بين الأقطاب والضغط الجوي، ويطبق تفريغ الشرارة لقياس الجهد العالي باستخدام قطب كروي .

ج - التفريغ في الفراغ Vacuum Discharge

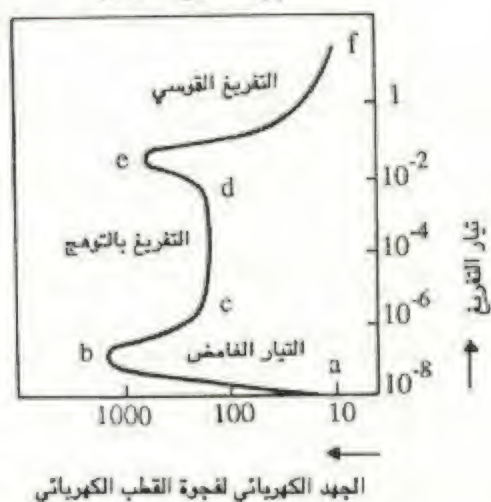
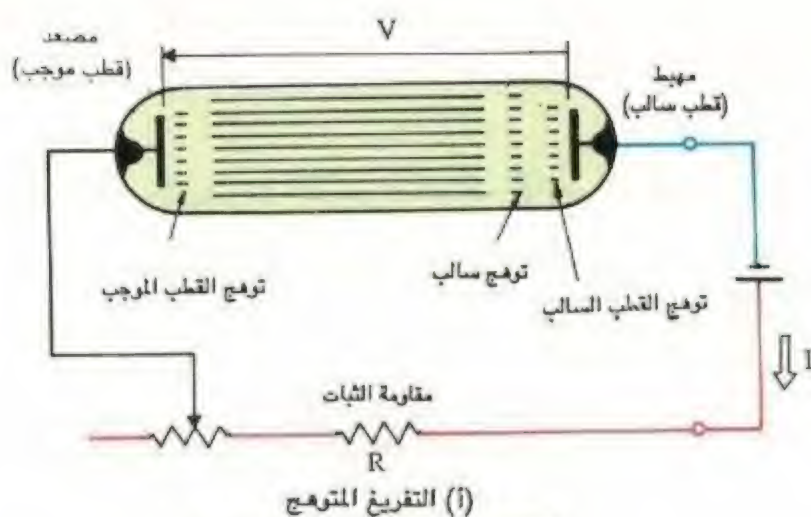
كما هو مبين بالشكل ٣ - ١٩ ، عند حفظ الضغط الجوي عند 1 مم زئبق* داخل أنبوبة زجاجية؛ فإنه يحدث تفريغ متنوع بالزيادة التدريجية في جهد التيار المستمر المسلط على القطب وهذا التفريغ هو التفريغ في الفراغ . يبين الشكل ٣ - ١٩ (ب) العلاقة بين الجهد $V(V)$ عبر القطبين والتيار التفريغ $I(A)$ في التفريغ في الفراغ .

خلال cd في الشكل ٣ - ١٩ (ب) ، يحدث التفريغ مع فترات إضاءة/ ظلام مستقرة، وعادة تصحب التفريغ إضاءة كما هو مبين بالشكل ٣ - ١٩ (أ) وهذا هو التفريغ بالتوهج . وكل جزء مضاء أو مظلم له مسمى مبين بالشكل ٣ - ١٩ (أ) . وتشتد الإضاءة

غالبا في العمود الموجب والقطب السالب المتوهج ، حيث تختلف ألوانهم وفقاً لأنواع الغاز الذي يملأ الأنبوبة .

تؤدي أية زيادة أخرى في الجهد المسلط إلى اصطدام الأيونات بالقطب السالب لتفريغ إلكترونات حرارية وفيرة . حينئذ يزداد التيار ليولد تفريغ قوس مع إضاءة شديدة .

في التفريغ بالتوهج والتفريغ القوسي نحتاج إلى مقاومة كبيرة لتثبيت الخاصية السالبة** ، كما هو مبين بالشكل ٣ - ١٩ (أ) .



(ب) العلاقة بين الجهد والتيار

الشكل ٣ - ١٩ التفريغ في الفراغ

* ضغط جوى واحد = 760 مم زئبق = 101325 باسكال .

1 مم زئبق = 133.322 باسكال ، حيث 1 باسكال يرمز له بالرمز Pa وهو مقدار ضغط 1 نيوتن مؤثرة على 1 م² .

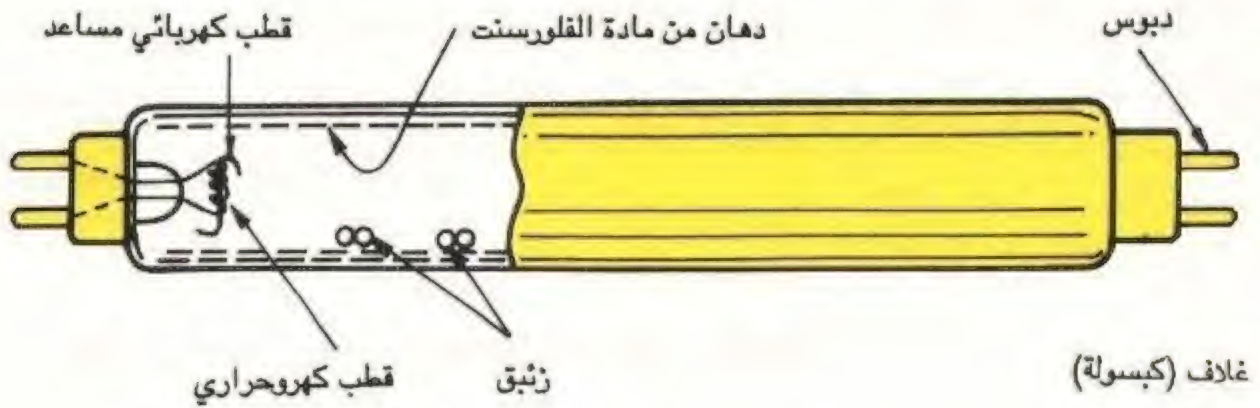
** الخاصية السالبة هي ظاهرة العلاقة بين الجهد والتيار، وفيها زيادة أحدهما يؤدي الى نقص الآخر ، وهذا يجعل التفريغ غير ثابت، وإدخال مقاومة كبيرة R في دائرة يزيد RI في حالة زيادة التيار I ليقطل جهد النهاية V للقوس مما ينتج عنه منع أية زيادة أخرى في التيار .

يستخدم التفريغ بالتوهج وتفريغ القوس لمختلف أنابيب التفريغ ولبات التفريغ . تستخدم الحرارة ذات درجات الحرارة العالية المتولدة بواسطة التفريغ القوسى للحام بالقوس .

٣ - ٥ - ٢ تطبيقات على ظاهرة التفريغ

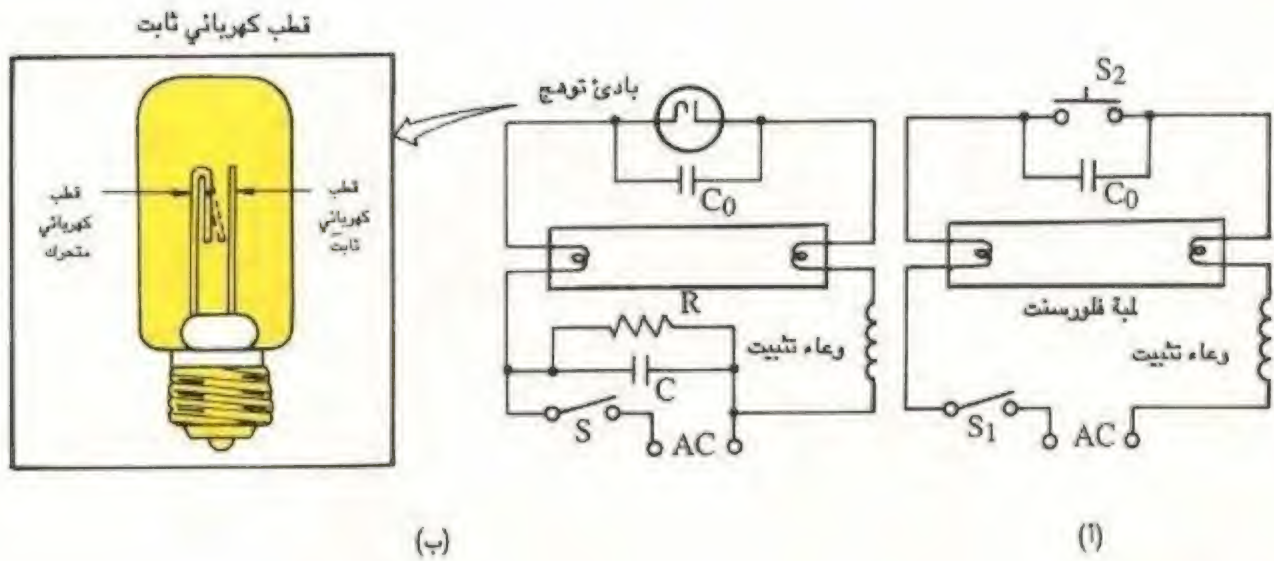
أ - المصباح الفلورسنت Fluorescent lamp

في المصباح الفلورسنت ، الضوء فوق البنفسجي ذو الموجة القصيرة المتولد بواسطة تفريغ القوس يصبوب إلى مادة الفلورسنت ليحولها إلى ضوء مرئى للاستخدام في الإضاءة . في الشكل ٣ - ٢٠ ، عند تثبيت أقطاب حرارية في كل من نهايتى أنبوبة زجاجية وفي حالة وضع قليل من الزئبق وغاز الأرجون داخل الأنبوبة للمساعدة في الإضاءة، تصطدم الإلكترونات الحرارية المصوبة من القطب مع ذرات الزئبق لتشع ضوءاً فوق بنفسجى . ذلك الضوء يصطدم بمادة الفلورسنت المدهون بها السطح الداخلى للأنبوبة فتضىء .



الشكل ٣ - ٢٠ مصباح الفلورسنت .

يستخدم المصباح الفلورسنت بصورة واسعة للإضاءة العامة على أساس حرية ضبط لون الإضاءة عن طريق تغيير مادة الفلورسنت ، وبالمقارنة بالمصباح المتوهج فإنه أكفأ ، وأحياناً ذو عمر أطول . إلا أن له بعض العيوب مثل الارتعاش ، ومعامل القدرة المنخفض ، وحدث الضوضاء .

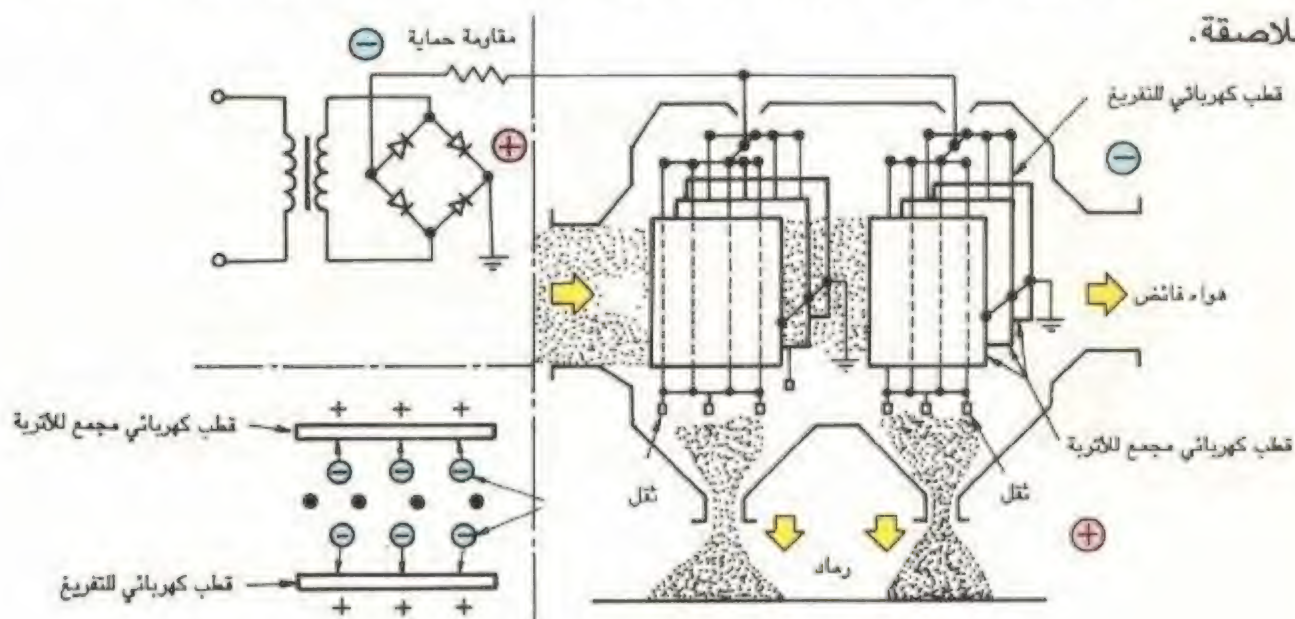


الشكل ٣ - ٢١ نظام إضاءة مصباح الفلورسنت .

بالإضافة إلى ذلك ، فإن مصباح الزئبق منخفض الجهد ، ومصباح الزئبق عالي الجهد ، ومصباح الصوديوم باستخدام التفريغ القوسي، وكذلك ضوء أنبوية النيون ومصباح النيون هي تطبيقات أخرى للتفريغ بالتوهج .

ب - الترسيب الكهربائي Electric precipitation

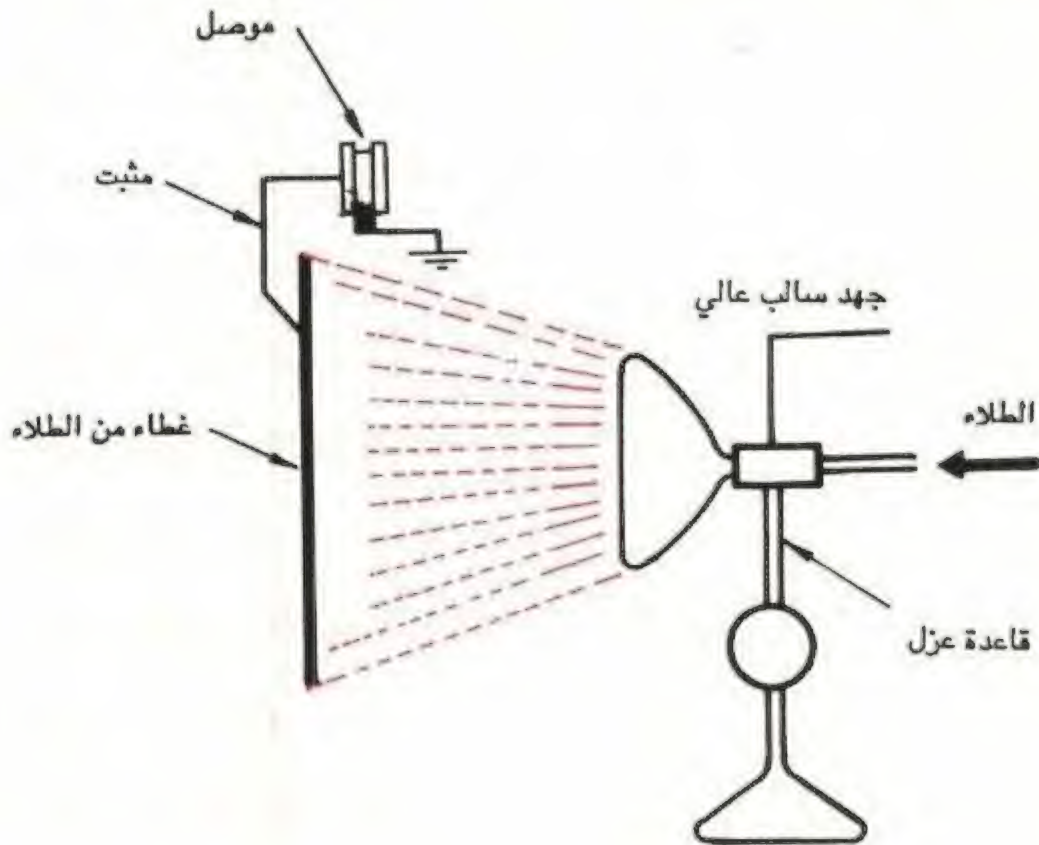
الترسيب الكهربائي هو نظام لامتصاص الجزيئات الدقيقة مثل الدخان والأتربة المكهربة بواسطة قوة كهربائية ساكنة ، ويستخدم الترسيب الكهربائي لمنع الدخان واسترداد المكونات الفاعلة التي لم تسترد. كما هو مبين بالشكل ٣ - ٢٢ ، نجد أن التفريغ التاجي ينتج من جهد تيار مستمر عالٍ قيمته بعض عشرات الألوف من الفولتات مسلط على قطب تفريغ مشكل على هيئة إبرة (أى قطب سالب) معلق لأسفل بين اللوحين المتوازيين لقطبي الترسيب (أى أقطاب موجبة). في حين نجد أن الدخان والجزيئات الدقيقة المعلقة في الغاز المار خلال كل من القطبين يتكهرب بالسالب فينتج عن ذلك انجذابها إلى القطب الموجب . وتتجمع المادة الملاصقة لقطب الترسيب بواسطة الدق على القطبين ليهتزاً فيحُل التصاقهما وتتساقط المادة الملاصقة.



الشكل ٣ - ٢٢ فكرة المرسب الكهربائي

حـ - الطلاء بالكهرباء الساكنة Electrostatic coating

الطلاء بالكهرباء الساكنة هو نظام له فكرة المرسب الكهربائي نفسها، ويستخدم لعمل طلاء بواسطة قوة الكهرباء الساكنة . وتؤدي طريقة الطلاء هذه إلى نتائج ممتازة وكفاءة عالية في الاستخدام خاصة في حالة طلاء اعداد كبيرة من الأشياء ، ويوضح الشكل ٣ - ٢٣ طريقة الطلاء بالكهرباء الساكنة وذلك عن طريق وجود جهد عالٍ وتيار مستمر سالب يسلط على قطب معزول فارغ ، على شكل قبة ومرشوش من جهة المثبت المعزول . ثم يجب أن تكهرب الجزيئات الدقيقة للدهان بالسالب حيث يلتصق الدهان بسطح الشيء . وتستخدم هذه الطريقة في السيارات والأجهزة الكهربائية المختلفة.



الشكل ٣ - ٢٣ الطلاء بالكهرباء الساكنة .

تمارين

١ - على فرض أن قوة تنافر قيمتها 10 نيوتن تؤثر على شحنتين متساويتين في المقدار ومن النوع نفسه بينهما مسافة 3 م في الهواء . احسب قيمة الشحنتين بالكولوم .

٢ - على فرض أن شحنة قيمتها 10 كولوم وضعت في مجال كهربائي شدته 5 فولت/م . احسب القوة المؤثرة على هذه الشحنة .

٣ - احسب الشحنة المخزنة في مكثف ذي سعة كهروستاتيكية قيمتها 5 ميكروفاراد تحت تأثير جهد قيمته 100 فولت . احسب كذلك الطاقة المخزنة في المكثف .

٤ - في الشكل ٣ - ٢٤ ، احسب :

(١) الشحنة المخزنة في المكثف C_1 ،

(٢) الشحنة المخزنة في المكثف C_2 ،

(٣) الشحنة المخزنة الكلية ،

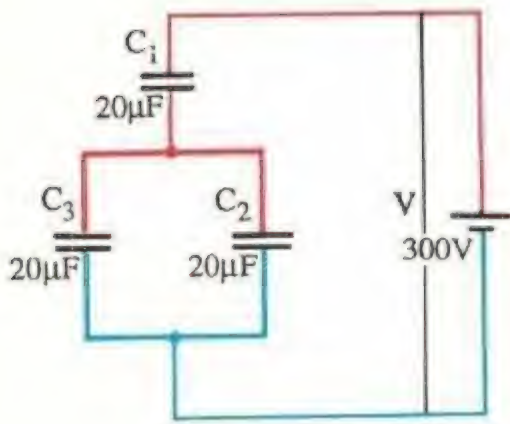
(٤) السعة الكهروستاتيكية المركبة .

٥ - في الشكل ٣ - ٢٥ ، احسب :

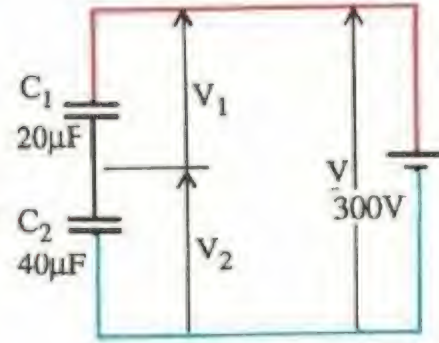
(١) السعة الكهروستاتيكية المركبة من C_1 و C_2

(٢) الجهد عبر C_1 وعبر C_2

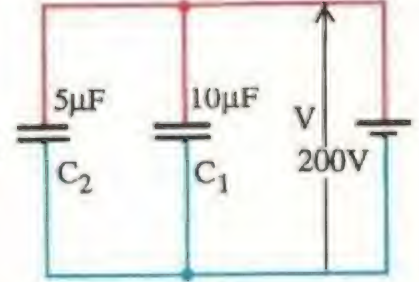
(٣) الشحنة الكلية المخزنة .



الشكل ٣ - ٢٦



الشكل ٣ - ٢٥



الشكل ٣ - ٢٤

٦ - في الشكل ٣ - ٢٦ . احسب السعة الكهروستاتيكية الكلية ؛ واحسب كذلك الشحنة الكلية المخزنة .

٧ - تحقق من أن السعة الكهروستاتيكية المركبة $C(F)$ هي :

$$C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$$

بالنسبة لدائرة مكونة من مكثفين متصلين على التوالي ذات سعة كهربائية ساكنة

قيمتها $C_1(F)$ ، $C_2(F)$

٨ - احسب الطاقة الكلية المخزنة في مكثفين لكل منهما سعة كهربائية ساكنة قيمتها

$C_1 = 2$ ميكروفاراد و $C_2 = 4$ ميكروفاراد موصولين على التوالي، وتحت تأثير جهد

قيمته 100 فولت . واحسبها كذلك في حالة التوصيل على التوازي .

الفصل الرابع

دائرة التيار المتغير

AC circuit

يستخدم التيار المتغير (الذي تتغير قيمته واتجاهه مع الزمن) فى الآلات الكهربائية والأجهزة والمعدات التي نستعملها في المصنع والمنزل . ويسمى مصدر القدرة الكهربائي للتيار المتغير بمصدر قدرة التيار المتغير، وتسمى الدائرة المتصلة بمصدر قدرة التيار المتغير بدائرة التيار المتغير .

ويستخدم التيار المتغير أيضاً على نطاق واسع في محطات الكهرباء حيث إن المولدات الضخمة في هذه المحطات يمكن رفع جهد التيار المتردد الناتج منها باستخدام المحولات ونقله لمسافات بعيدة بطريقة مناسبة . كما إن عملية خفض الجهد ورفعته ذات أهمية بالغة للاستخدامات المختلفة .

وفي هذا الفصل سيتم أولاً شرح العمليات الأساسية للتيار المتغير الجيبي، وبعد ذلك سندرس دوائر التيار المتغير التي تحتوى على مقاومة وملف ومكثف .

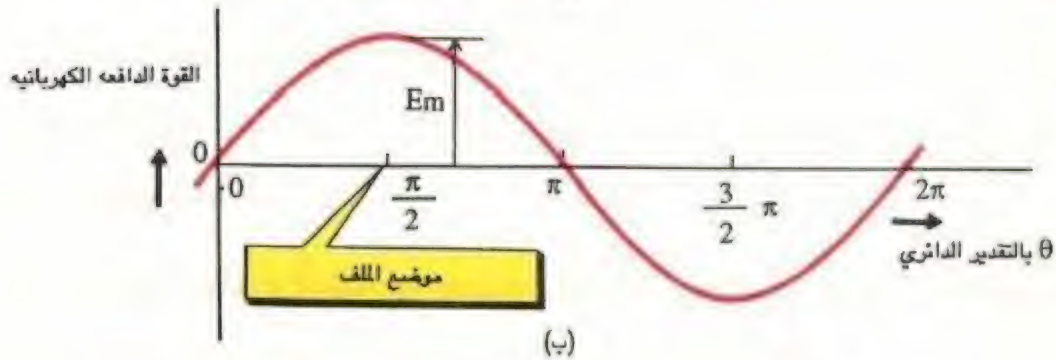
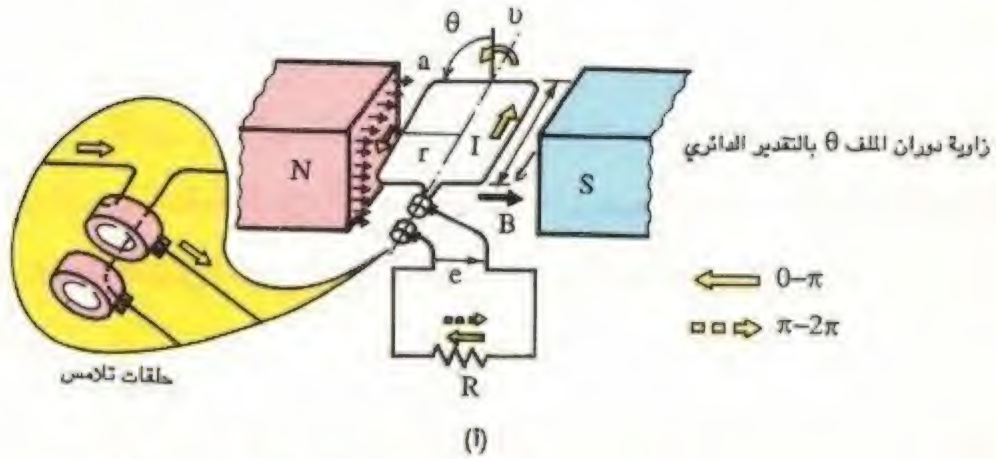
٤ - ١ التيار المتغير ذو الموجة الجيبية Sinusoidal wave

٤ - ١ - ١ توليد التيار المتغير ذي الموجة الجيبية

يستخدم التيار المتغير كمصدر قدرة في المصنع والمنزل ، ويمكن التعبير عن التيار المتغير والجهد المتغير كدالة في الزمن في صورة منحني جيبي، ولذا يسمى هذا التيار باسم التيار المتغير ذي الموجة الجيبية .

ويبين الشكل ٤ - ١ (أ) أنه عند وضع ملف في مجال مغناطيسى منتظم ثم إدارة هذا

الملف في الاتجاه المبين بالشكل بسرعة ثابتة، تتولد قوة دافعة كهربائية يتغير اتجاهها دورياً مع وضع الملف طبقاً لقاعدة اليد اليمنى لفلمنج أما الشكل الجيبى المبين في الشكل ٤-١ (ب) فيوضح تغير قيمة القوة الدافعة الكهربائية المأخوذة باستخدام حلقتي تلامس متصلتين بالحمل



الشكل ٤ - ١ توليد التيار المتغير ذي الموجة الجيبية .

يمكن تمثيل القوة الدافعة الكهربائية $e(V)$ لهذا التيار المتغير ذي الموجة الجيبية بالمعادلة الآتية :

$$e = E_m \sin \theta \quad (V) \quad (4-1)$$

حيث أن القوة الدافعة الكهربائية (e) هي دالة في زاوية دوران الملف (θ) ، وتتغير قيمتها واتجاهها مع وضع الملف لتعطي القيمة اللحظية للجهد . وتحدد القيمة القصوى (E_m) لهذا الجهد بطول وعدد لفات الملف، وشدة المجال المغناطيسي، وسرعة الدوران .

٤ - ١ - ٢ التعبير عن الزاوية والسرعة الزاوية Angular velocity

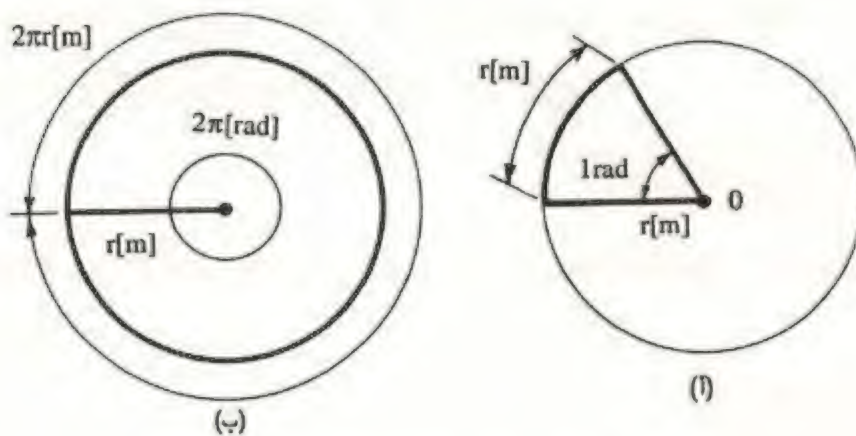
١- الطريقة الدائرية

يمكن قياس الزاوية بالتقدير الدائري (رمز الوحدة هو rad) وأيضاً بالدرجات (رمز الوحدة (°)) . ويستخدم التقدير الدائري للحسابات النظرية . والتعبير عن الزاوية باستخدام التقدير الدائري يسمى الطريقة الدائرية (انظر الجدول ٤-١) .

درجة	45	57.3	90	180	270	360
وحدة قياس الزاوية	$\frac{\pi}{4}$	1	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3}{2} \pi$	2π

الجدول ٤ - ١ تحويل التقدير الدائري لقياس الزوايا

وفي الشكل ٤ - ٢ (أ) نجد دائرة نصف قطرها (r) . وتعرف وحدة التقدير الدائري للزاوية (rad) بأنها الزاوية المركزية التي يقابلها قوس طوله يساوي نصف قطر الدائرة . أما الشكل ٤ - ٢ (ب) فيبين أن محيط الدائرة ($2\pi r$) يقابله زاوية مركزية قيمتها (2π) بالتقدير الدائري، وذلك بقسمة طول المحيط على طول قوس زاوية وحدة التقدير الدائري .



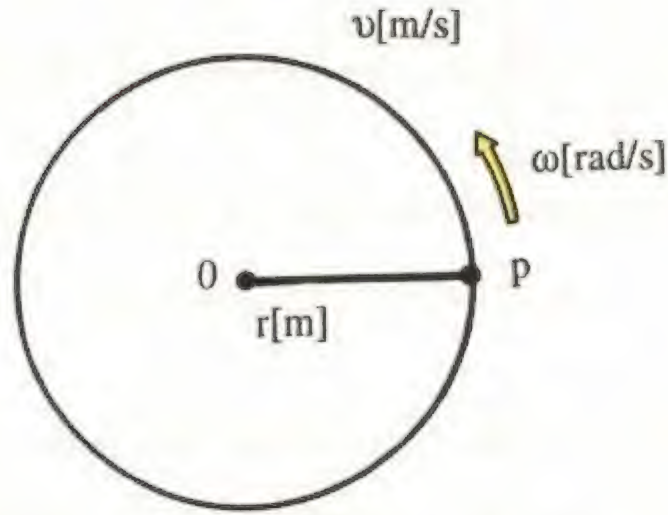
الشكل ٤ - ٢ الطريقة الدائرية

ب- السرعة الزاوية

في الشكل ٤ - ٣ نفترض أن النقطة (P) لها حركة دائرية منتظمة بمعدل (f) دورة كل ثانية في عكس اتجاه عقارب الساعة حول النقطة (O) فتكون سرعتها (v(m/s) طبقاً للمعادلة :

$$v = 2 \pi r f \quad (m/s)$$

(4 - 2)



الشكل ٤ - ٣ الحركة الدائرية المنتظمة والسرعة الزاوية

السرعة الزاوية للنقطة P إلى النقطة O هي تعبير عن حركة النقطة P مع زاوية دوران الخط OP والسرعة الزاوية (ω) يمكن كتابتها كما يلي :

$$\omega = 2 \pi f \quad (rad/s)$$

(4 - 3)

ولهذا فإن العلاقة بين السرعة v التي تعبر عن حركة النقطة P والسرعة الزاوية (ω) تتحدد طبقاً للمعادلة :

$$v = r \omega \quad (m/s)$$

(4 - 4)

في الشكل ٤ - ١ تتولد القوة الدافعة الكهربائية للتيار المتغير الجيبي التي تقوم بتكرار الشكل الموجي (f) مرة كل ثانية ، وذلك بواسطة دوران الملف (f) مرة كل ثانية .

٤ - ١ - ٣ زمن الدورة والتردد Period and frequency

تتغير سعة الجهد والتيار المتغير (كما في الشكل ٤ - ٤) دورياً مع الزمن، وتتكرر التغيرات نفسها كل زمن $T(s)$. ويسمى التغير الموجي المفرد الذي يتكرر « بدورة واحدة » . والدورة $T(s)$ هي الزمن اللازم لدورة كاملة، والتردد هو عدد الدورات التي تتكرر كل ثانية . ويرمز للتردد بالرمز f ووحدة قياس التردد هي الهرتز (Hz) . أما الترددات العالية فوحدات قياسها هي الكيلوهرتز (kHz) والميغاهرتز (MHz) والجيغاهرتز (GHz) .
 $1\text{kHz} = 10^3 \text{ Hz}, 1\text{MHz} = 10^6 \text{ Hz}, 1\text{GHz} = 10^9 \text{ Hz}$

والعلاقة بين التردد $f(\text{Hz})$ والدورة $T(s)$ هي :

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{Hz}) , \quad T = \frac{1}{f} \quad (s) \quad (4-5)$$

لاحظ أن $\omega(\text{rad/s})$ في المعادلة (3-4) هي التردد الدائري أو الزاوي أما $f(\text{Hz})$ فهي التردد .



الشكل ٤ - ٤ الدورة الزمنية والتردد

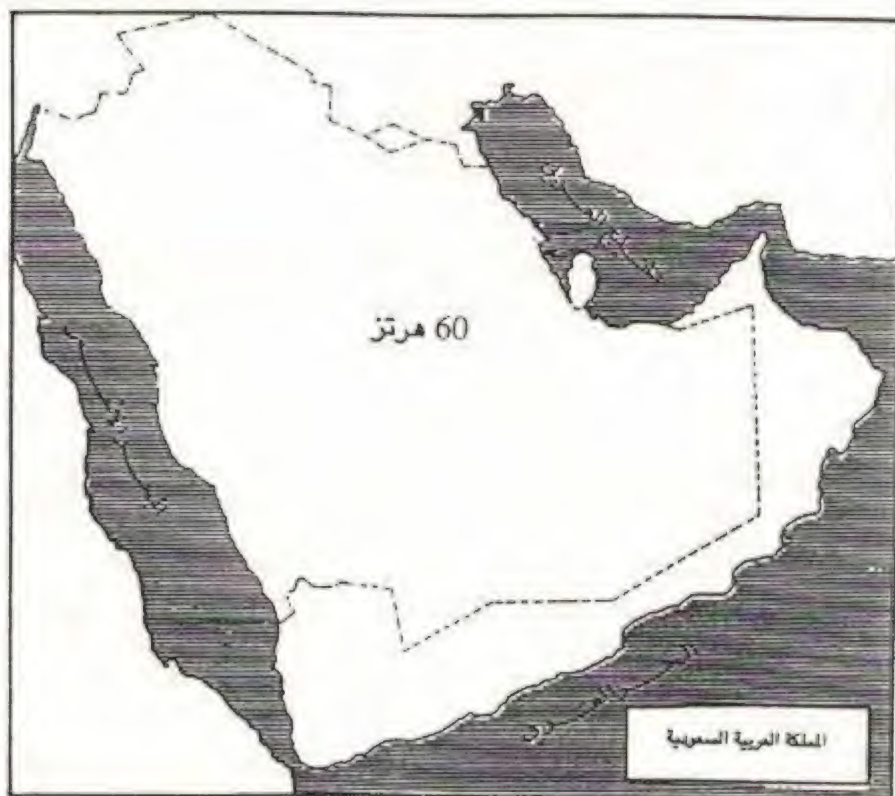
لنفترض أن عدد الأقطاب المغناطيسية في مولد التيار المتغير أو محرك التيار المتغير هو (P) وأن سرعة الدوران هي $n_s(\text{rpm})$ نحصل على تيار متغير تردده $(p/2)$. وعلى هذا فإن هناك علاقة بين التردد $f(\text{Hz})$ وسرعة الدوران $n_s(\text{rpm})$.

الترددات التجارية في الدولة

يبين الشكل ٤ - ٥ ترددات التيار المتغير الذي تنتجه شركات الكهرباء لتغذية المصانع والمنازل : وهي 60 هرتز في أنحاء المملكة كافة وتسمى بالترددات التجارية .

والفرق في التردد ينشأ من مكان استيراد المولد والمحرك فهو بتردد 50 هرتز في أوروبا، وبتردد 60 هرتز في الولايات المتحدة الأمريكية .

$$f = \frac{p}{2} \cdot \frac{n_s}{60} = \frac{pn_s}{120} \text{ (Hz)}, \quad n_s = \frac{120 f}{p} \text{ (rpm)} \quad (4 - 6)$$



الشكل ٤ - ٥ التردد التجاري في المملكة

سؤال ١

احسب قيمة 120 بالتقدير الدائري . ثم احسب قيمة الزاوية الدائرية $(\frac{\pi}{6})$ بالدرجات .

سؤال ٢

في الشكل ٤ - ٣ نفترض أن P تقوم بحركة دائرية منتظمة 50 مرة في الثانية. احسب السرعة v (m/s) والسرعة الزاوية ω (rad/s) للنقطة P إذا كان نصف قطر الدائرة يساوى 1 م .

سؤال ٣

احسب الدورة الزمنية للتيار المتغير ذي الموجة الجيبية عند ترددات 50 هرتز، 1 كيلو هرتز .

سؤال ٤

احسب تردد التيار المتغير ذي الموجة الجيبية إذا كان زمن الدورة يساوى 40 ميلي ثانية، ومرة أخرى عند 20 ميكروثانية .

٤ - ١ - ٤ قيمة التيار المتغير

توضح المعادلة (1 - 4) التعبير الرياضى للقيمة اللحظية لجهد التيار المتغير الجيبى. وعند التعبير عن زاوية دوران الملف θ (rad) بدلالة التردد الدائرى ω (rad/s) والزمن t (s) نحصل على المعادلة الآتية :

$$e = E_m \sin \theta = E_m \sin \omega t = E_m \sin 2 \pi f t \quad (V) \quad (4-7)$$

وفي العادة نعبر عن سعة جهد التيار المتغير بدلالة القيمة الفعالة والقيمة المتوسطة بدلاً من القيمة اللحظية . ويبين الشكل ٤ - ٦ (أ) أن القيمة الفعالة تعبر عن مقدار التيار المستمر الذي يعطي كمية الحرارة نفسها (بالجول) عند مروره في المقاومة نفسها خلال المدة الزمنية $T(s)$ مثل التيار المتغير . ويبين الشكل ٤ - ٦ (ب) أن القيمة المتوسطة هي مقدار القيمة اللحظية خلال نصف الدورة الموجبة للتيار المتغير . وتوضح العلاقات الآتية كيفية حساب كل من القيمة الفعالة E والقيمة المتوسطة E_a :

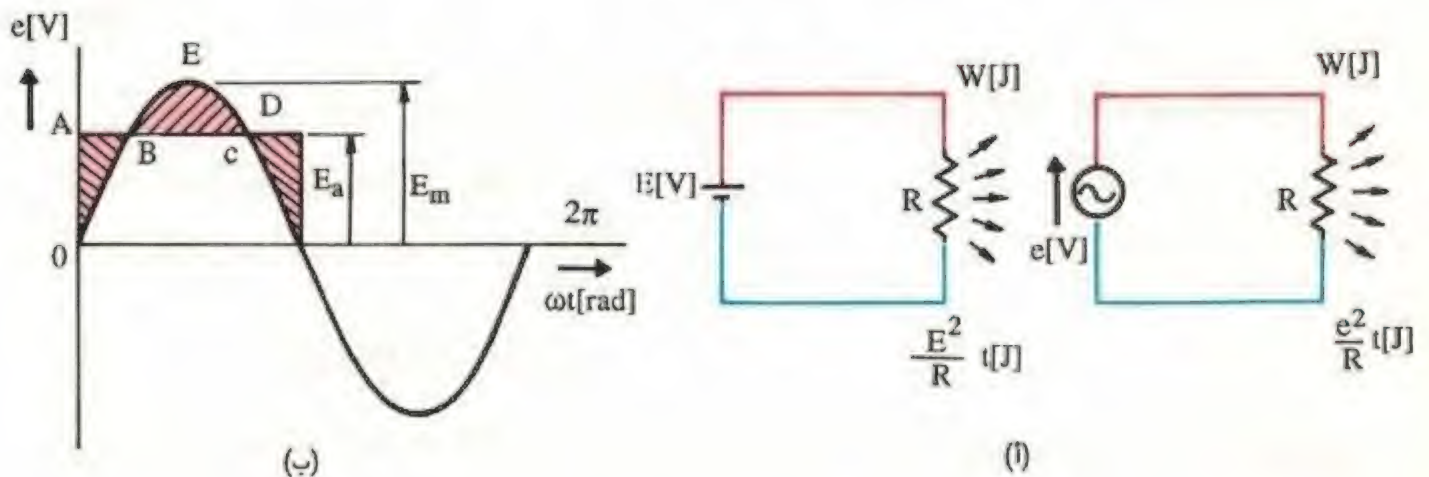
$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707 E_m (V),$$

$$E_a = \frac{2}{\pi} E_m = 0.637 E_m (V) \quad (4-8)$$

وبالمثل، فإن العلاقة بين القيمة القصوى I_m والقيمة الفعالة I والقيمة المتوسطة I_a للتيار المتغير هي كالتالي :

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m (A),$$

$$I_a = \frac{2}{\pi} I_m = 0.637 I_m (A) \quad (4-9)$$



الشكل ٤ - ٦ القيمة الفعالة والقيمة المتوسطة .

وبلاحظ أن الحرارة (مقدرة بالچول) التي تتولد خلال دورة التيار المتغير (s) T تقدر من المعادلة :

$$W = \frac{E^2}{R} T = \int_0^T \frac{e^2}{R} dt = \int_0^T \frac{E_m^2}{R} \sin^2 \omega t dt = \frac{E_m^2}{R} \int_0^T \sin^2 \omega t dt$$

وحل المعادلة هو : $E = E_m / \sqrt{2}$

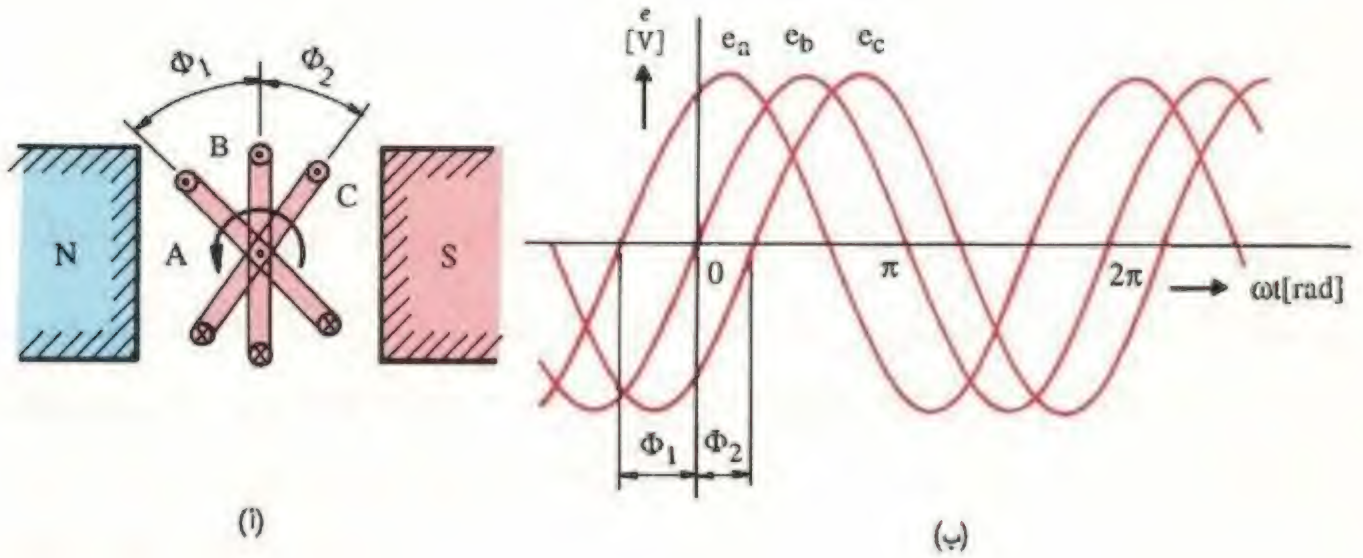
٤ - ١ - ٥ زاوية الطور وفرق زاوية الطور Phase and phase difference

يوضح الشكل ٤ - ٧ (أ) أنه عند وضع 3 ملفات لها الشكل نفسه في مجال مغناطيسي منتظم ودورانها في الاتجاه الموضح بالشكل بسرعة زاوية قيمتها ω (rad/s) حول محور الدوران نفسه تتولد القوى الدافعة الكهربائية e_a (V) , e_b (V) , e_c (V) في هذه الملفات طبقاً للعلاقات الآتية :

$$\left. \begin{aligned} e_a &= \sqrt{2} E \sin (\omega t + \Phi_1) \quad (V) \\ e_b &= \sqrt{2} E \sin \omega t \quad (V) \\ e_c &= \sqrt{2} E \sin (\omega t - \Phi_2) \quad (V) \end{aligned} \right\} (4-10)$$

ويوضح الشكل ٤ - ٧ (ب) شكل الموجة لكل قوة دافعة كهربائية . وزاوية طور كل من هذه القوى الدافعة الكهربائية للتيار المتغير الجيبى هي $(\omega t + \Phi_1)$, (ωt) , $(\omega t - \Phi_2)$ على الترتيب . وزاوية الطور الابتدائية عند $t = 0$ هي Φ_1 , 0 , $-\Phi_2$ على الترتيب . والفرق بين الزاوية الابتدائية لكل قوة دافعة كهربائية يسمى فرق زاوية الطور . فمثلاً فرق زاوية الطور في e_b , e_a هو $\Phi = \Phi_1 - 0 = \Phi_1 > 0$ أي أن e_a تتقدم على e_b بمقدار Φ_1 (rad) في زاوية الطور . ويبين الشكل ٤ - ٧ (ب) أن فرق زاوية الطور بين e_b , e_c هو $\Phi = (-\Phi_2) - 0 = -\Phi_2 < 0$ أي إن e_c تتأخر عن e_b بمقدار Φ_2 (rad) في زاوية الطور .

وبين الشكل ٤ - ٧ (ب) أن فرق الشكل الموجي للجهد e_c عن الشكل الموجي للجهد e_b في الاتجاه الموجب هو $\Phi_2(\text{rad})$. إذا أصبح فرق زاوية الطور بين الشكلين الموجيين يساوي صفرًا $\Phi = 0$ فإنهما يكونان في الطور نفسه.



الشكل ٤ - ٧ زاوية الطور وفرق زاوية الطور .

سؤال ٥

عندما تكون المعادلات الخاصة بقوتين دافعتين كهربائيتين هي كما يلي :

$$e_a = 100\sqrt{2} \sin \omega t \text{ (V) } , e_b = 100\sqrt{2} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right) \text{ (V) } , f = 50 \text{ Hz}$$

احسب :

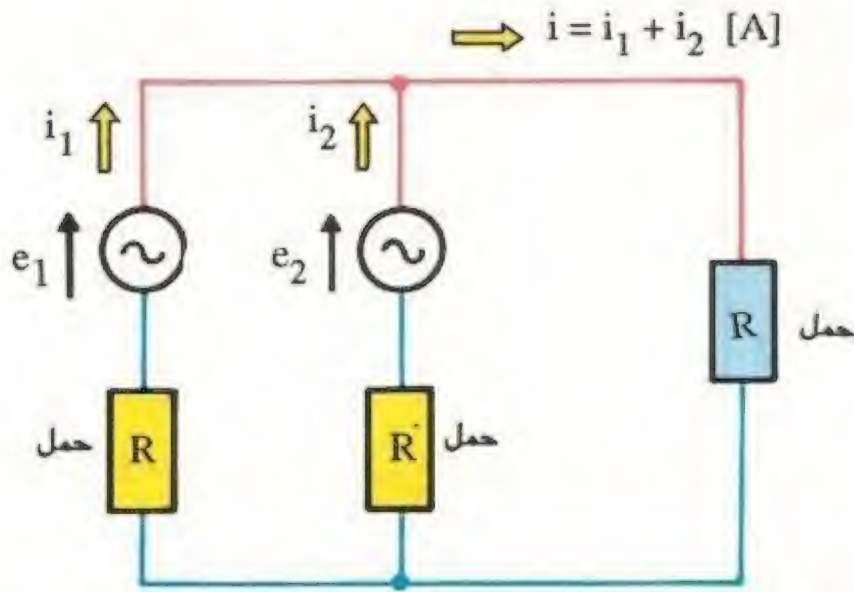
١ - القيمة اللحظية لكل منهما عند $(t = 5 \text{ ms})$.

٢ - القيمة القصوى و القيمة الفعالة و القيمة المتوسطة للجهد e_a .

٣ - زاوية الطور الابتدائية لكل منهما وفرق زاوية الطور بينهما .

٤ - ١ - ٦ تجميع التيارات المتغيرة ذات الموجة الجيبية

عند اضافة أكثر من إشارة للتيار المتغير ذي الموجة الجيبية يمكننا إيجاد مجموعها باستخدام الرسم البياني أو بعمل معادلة للحسابات والمتجهات . ويبين الشكل ٤ - ٨ التيار (i) الناتج من جمع تيارين متغيرين (i_2, i_1) وإمرار المجموع خلال الحمل .



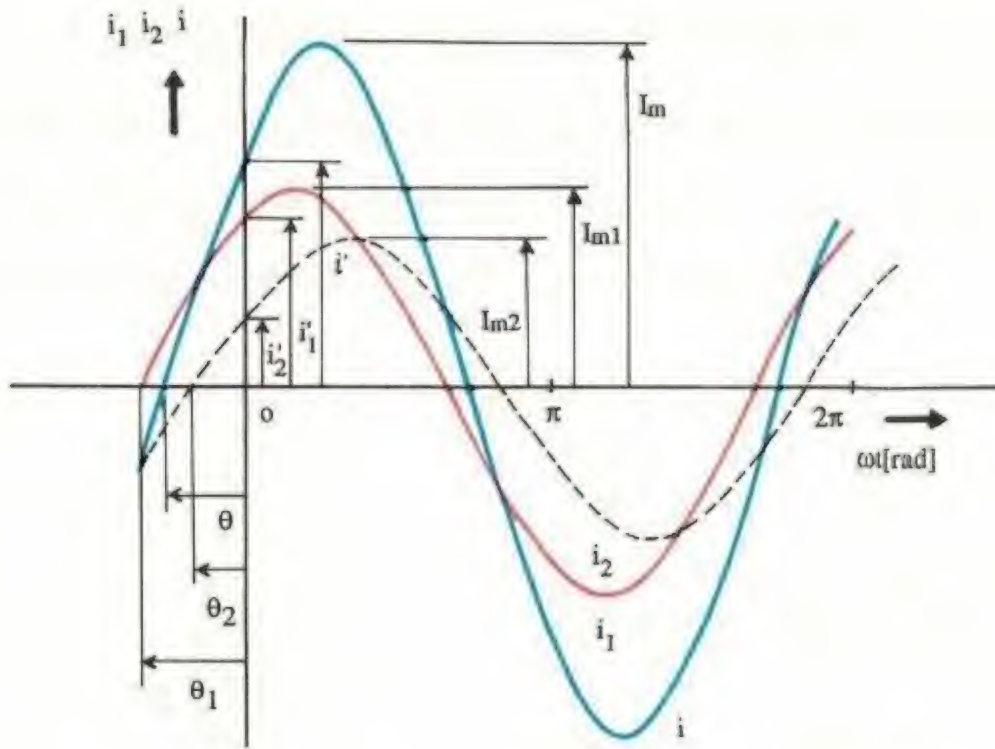
الشكل ٤ - ٨ تجميع التيارات المتغيرة ذات الموجة الجيبية AC

ويبين الشكل ٤ - ٩ تيارين متغيرين ذوي الموجة الجيبية (i_2, i_1) وعن طريق الرسم البياني يتم إيجاد مجموعهما (i) بتجميع القيم اللحظية لكل منهما عند كل لحظة زمنية . وتبين النتيجة أن التردد الدائري ω للتيار الناتج يساوى التردد الدائري لكل من التيارين (i_2, i_1) .

$$i_1 = I_{m1} \sin (\omega t + \theta_1) \quad (4 - 11)$$

$$i_2 = I_{m2} \sin (\omega t + \theta_2) \quad (4 - 12)$$

$$i = I_m \sin (\omega t + \theta) \quad (4 - 13)$$



الشكل ٤ - ٩ إيجاد مجموع تيارين متغيرين بأشكال جيبية .

ويمكن إيجاد مجموع التيارين باستخدام المعادلات الخاصة بالقيم اللحظية كالآتي:

نفترض أن التيار i_1 (A) والتيار i_2 (A) يمران خلال الحمل نفسه والقيمة اللحظية لكل منهما معطاة بالمعادلات (4 - 11) ، (4 - 12) . وبجمع هاتين المعادلتين نحصل على معادلة للقيمة اللحظية للتيار الناتج :

$$\begin{aligned} i &= i_1 + i_2 = I_{m1} \sin(\omega t + \theta_1) + I_{m2} \sin(\omega t + \theta_2) \\ &= I_{m1} (\sin \omega t \cos \theta_1 + \cos \omega t \sin \theta_1) + I_{m2} (\sin \omega t \cos \theta_2 + \cos \omega t \sin \theta_2) \\ &= (I_{m1} \cos \theta_1 + I_{m2} \cos \theta_2) \sin \omega t + (I_{m1} \sin \theta_1 + I_{m2} \sin \theta_2) \cos \omega t \end{aligned}$$

$$A = I_{m1} \cos \theta_1 + I_{m2} \cos \theta_2 , \quad B = I_{m1} \sin \theta_1 + I_{m2} \sin \theta_2 \quad \text{نفترض أن}$$

$$i = \sqrt{A^2 + B^2} \left[\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} \sin \omega t + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \cos \omega t \right]$$

$$i = I_m (\cos \theta \sin \omega t + \sin \theta \cos \omega t) = I_m \sin (\omega t + \theta) \quad (4-14)$$

$$I_m = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{(I_{m1} \cos \theta_1 + I_{m2} \cos \theta_2)^2 + (I_{m1} \sin \theta_1 + I_{m2} \sin \theta_2)^2}$$

$$= \sqrt{I_{m1}^2 + I_{m2}^2 + 2 I_{m1} I_{m2} \cos (\theta_1 - \theta_2)}$$

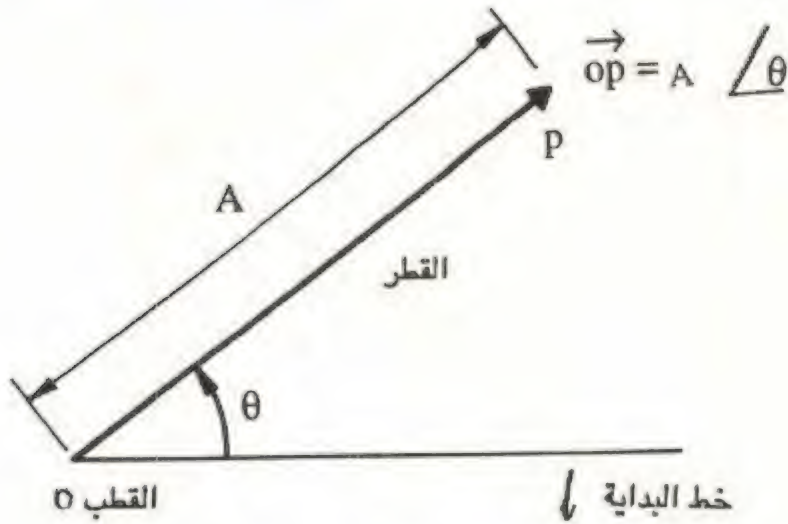
$$\tan \theta = \frac{B}{A} = \frac{I_{m1} \sin \theta_1 + I_{m2} \sin \theta_2}{I_{m1} \cos \theta_1 + I_{m2} \cos \theta_2}$$

ومن المعادلة (4-14) نجد أن التيار $i \{ A \}$ الناتج من تجميع التيارين الجيبين $i_1(A)$, $i_2(A)$ وكل منهما له التردد الدائري نفسه $\omega(\text{rad/s})$ يكون له شكل موجي جيبى وله تردد دائرى يساوى التردد الدائري لكل من التيارين على الرغم من اختلاف زاوية الوجه الابتدائية لكل منهما .

أ- المتجه Vector

هناك عدة متغيرات - مثل الزمن والكتلة والحجم ودرجة الحرارة - لها قيمة فقط وتسمى كميات قياسية ؛ وفى مقابل ذلك هناك أيضاً كميات مثل القوة والسرعة وشدة المجال الكهربائي وشدة المجال المغناطيسي لها اتجاه بالإضافة إلى أن لها قيمة وتسمى بكميات اتجاهية .

ويعامل تيار وجهد الموجة الجيبية معاملة المتجهات ومعاملة الأرقام المركبة التخيلية وفي هذا الجزء نقوم بدراسة خواص المتجهات .



الشكل ٤ - ١١ الإحداثيات القطبية

يلاحظ أنه إذا كان $(\tan \theta > 0)$ فليس من الضروري أن تقع الزاوية (θ) في الربع الأول . وإذا كان $(A < 0)$ وكان $(B < 0)$ فإن الزاوية (θ) تقع في الربع الثالث . ويتحدد الربع الذي تقع فيه الزاوية (θ) بإشارات A, B .

والإحداثى السيني للمتجه OP هو (a) والإحداثى الصادي هو (b) .

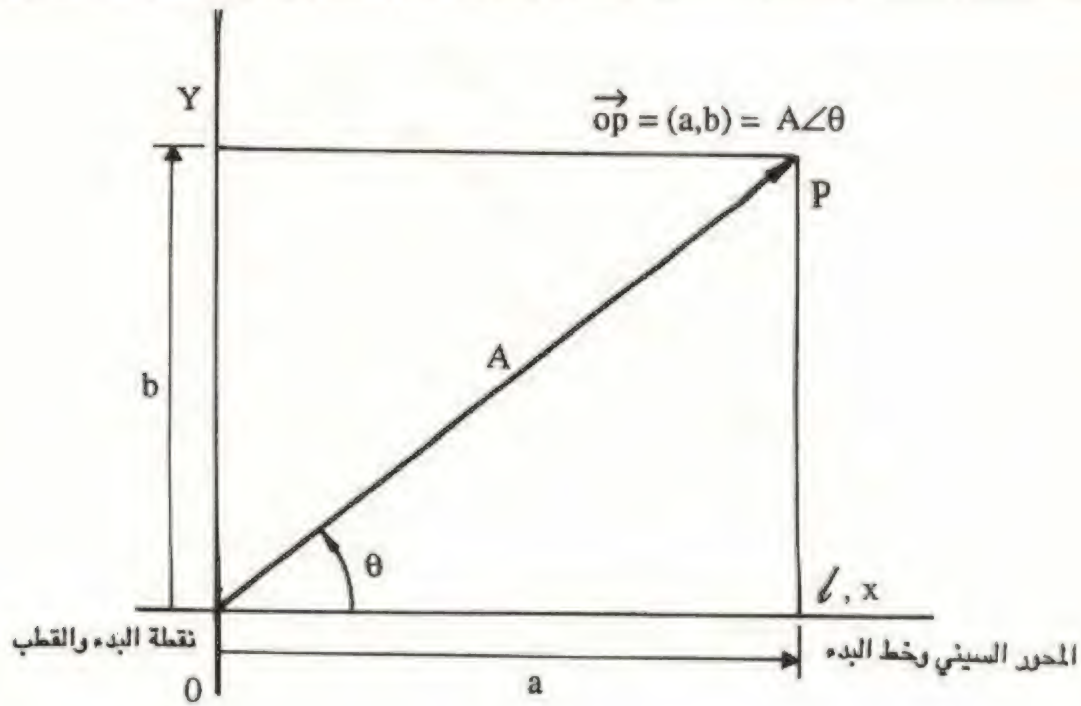
ويتضح من الشكل ٤ - ١١ أن الإحداثيات القطبية يمكننا من تمثيل المتجه OP برسم خط طوله يساوى قيمة المتجه، وزاويته (θ) ومقاسه في عكس اتجاه عقارب الساعة من خط البدء . وفى هذا الكتاب نعبر عن الإحداثيات القطبية لهذا المتجه كالاتي: $A \angle \theta$.

ويبين الشكل ٤ - ١٢ العلاقة بين الإحداثيات المتعامدة والإحداثيات القطبية للمتجه OP ويتضح ذلك في المعادلة (4 - 15) . وعلى العكس إذا كانت العلاقة بين الإحداثيات المتعامدة لمتجه والإحداثيات القطبية لمتجه آخر هي كما في المعادلة (4 - 15) فإن المتجهين يتطابقان .

$$a = A \cos \theta, \quad b = A \sin \theta$$

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad \tan \theta = \frac{b}{a}$$

} (4 - 15)



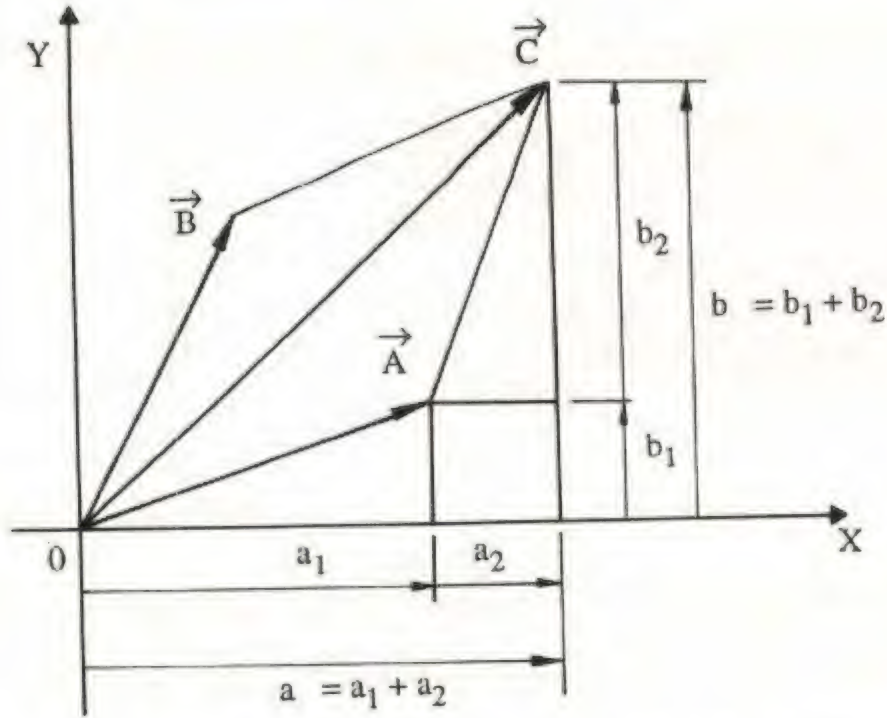
الشكل ٤ - ١٢ العلاقة بين الإحداثيات المتعامدة والإحداثيات القطبية

د- جمع المتجهات

عند جمع المتجه $\vec{A} = (a_1, b_1)$ والمتجه $\vec{B} = (a_2, b_2)$ نحصل على المتجه $\vec{C} = (a, b)$ والمتجه المحصلة \vec{C} هو القطر لمتوازي الأضلاع المار بنقطة الأصل (O) والذي جانباها هما \vec{A} ، \vec{B} . كما هو مبين بالشكل ٤ - ١٣ . ويمكن إيجاد قيمة الإحداثى السينى (a) والإحداثى الصادى (b) للمتجه المحصلة \vec{C} بجمع الإحداثيات السينية للمتجهات \vec{A} ، \vec{B} وجمع الإحداثيات الصادية للمتجهات \vec{A} ، \vec{B} على الترتيب كمايلي :

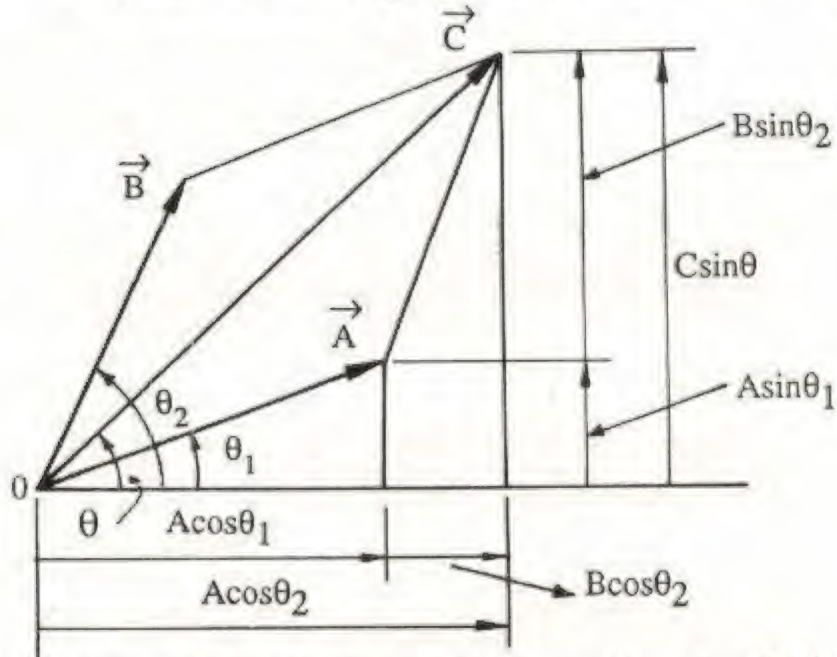
$$a = a_1 + a_2 , \quad b = b_1 + b_2$$

(4 - 16)



الشكل ٤ - ١٣ جمع المتجهات في الإحداثيات المتعامدة

ويبين الشكل ٤ - ١٤ كيفية جمع المتجهات $\vec{A} = A \angle \theta_1$ ، $\vec{B} = B \angle \theta_2$ للحصول على المتجه المحصلة $\vec{C} = C \angle \theta$ في الإحداثيات القطبية .



الشكل ٤ - ١٤ جمع المتجهات في الإحداثيات القطبية

ويمكن إيجاد قيمة المتجه المحصلة C وزاويته θ من الإحداثيات المتعامدة كمايلي :

$$C = \sqrt{A^2 + B^2 + 2 AB \cos (\theta_1 - \theta_2)}$$

$$\tan \theta = \frac{A \sin \theta_1 + B \sin \theta_2}{A \cos \theta_1 + B \cos \theta_2}$$

} (4-17)

د- ضرب المتجه في رقم حقيقي

عند ضرب المتجه \vec{A} في الرقم الحقيقي الموجب (m) نحصل على المتجه $m\vec{A}$ الذي له اتجاه A نفسه، ولكن قيمته تساوي m مضروبة في طول المتجه A . وعند ضرب المتجه \vec{A} في الرقم الحقيقي السالب ($-m$) نحصل على المتجه $-m\vec{A}$ ويكون اتجاهه عكس اتجاه A وقيمته تساوي m مضروبة في طول المتجه A .

هـ- قوانين عمليات المتجهات

تحكم المتجهات قوانين عمليات بيانها كالتالي : لنفرض أن $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$ هي ثلاثة متجهات، اذن يمكن استنتاج القوانين الآتية :

قانون الترافق

$$(\vec{A} + \vec{B}) + \vec{C} = \vec{A} + (\vec{B} + \vec{C})$$

قانون الاستبدال

$$\vec{A} + \vec{B} = \vec{B} + \vec{A}$$

(\vec{O} هو متجهة الصفر)

$$\vec{O} + \vec{A} = \vec{A} + \vec{O} = \vec{A}$$

$$(-\vec{A}) + \vec{A} = \vec{A} + (-\vec{A}) = \vec{0}$$

وتنطبق قوانين العمليات الآتية على ضرب المتجه في الأرقام الحقيقية (m, n).

قانون الترافق

$$(mn) \vec{A} = m(n \vec{A})$$

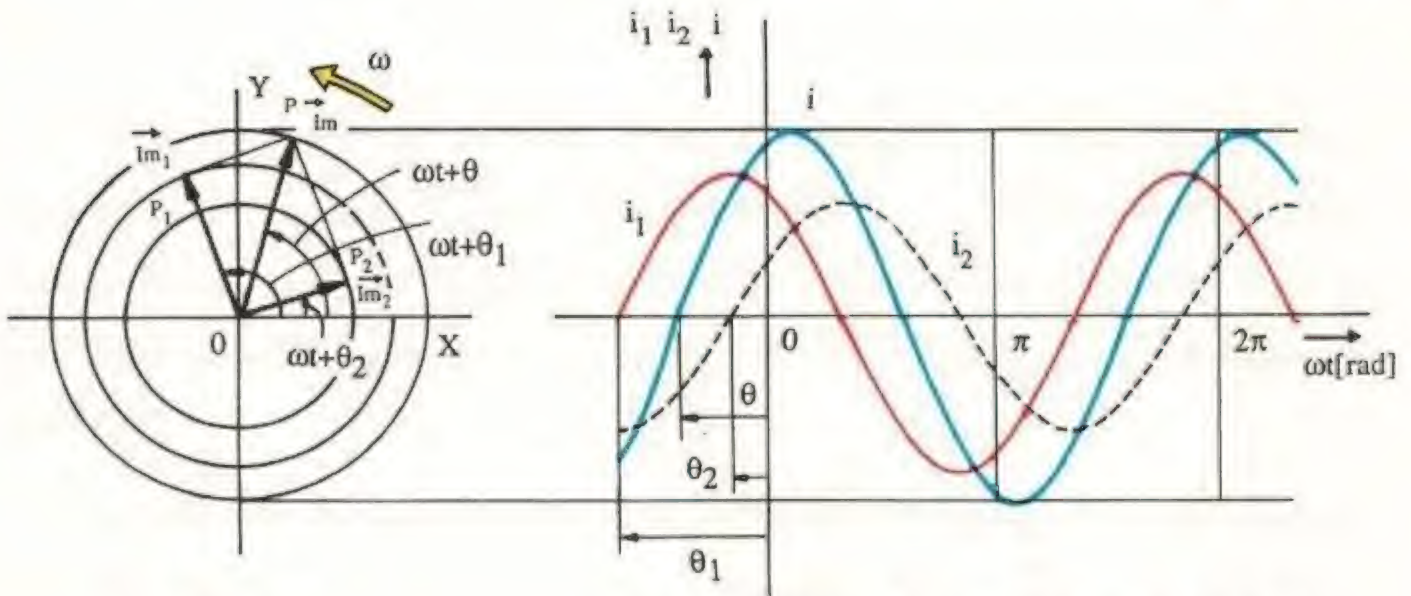
قانون التوزيع

$$m(\vec{A} + \vec{B}) = m\vec{A} + m\vec{B}$$

$$(m+n) \vec{A} = m\vec{A} + n\vec{A}$$

إيجاد قيمة مجموع تيارين باستخدام المتجهات

كما في الشكل ٤ - ١٥ (أ) نفرض أن المتجه $\vec{OP_1}$ في الإحداثيات المتعامدة يدور حول نقطة الأصل بسرعة دائرية قيمتها $\omega(\text{rad/s})$.



(أ) المتجه الدائر

(ب) الاحداثي الصادي للمتجه الدائر والموجة الجيبية للتيار المتغير

الشكل ٤ - ١٥ العلاقة بين الموجة الجيبية للتيار المتغير والمتجه

نفترض أن قيمة المتجه $\vec{OP_1}$ هي أقصى قيمة $I_{m1}(A)$ للتيار المتغير $I_1(A)$ ذي الموجة الجيبية، وأن الزاوية التي يصنعها $\vec{OP_1}$ مع \vec{Ox} هي زاوية الطور الابتدائية θ_1 عند الزمن $t = 0$ فيكون الإحداثي الصادي للمتغير الدائري $\vec{OP_1}$ هي الموجة الجيبية للتيار المتغير كما في الشكل ٤ - ١٥ .

وبالطريقة نفسها إذا افترضنا أن قيمة المتجه $\vec{OP_2}$ الذي يدور حول نقطة الأصل (O) بالسرعة الدائرية نفسها ω (rad/s) وبالمثل فإن قيمة المتجه $\vec{OP_1}$ هي أقصى قيمة $I_{m2}(A)$ للتيار المتغير $I_2(A)$ ذي الموجة الجيبية نفسها ، وأن الزاوية التي يصنعها $\vec{OP_2}$ مع \vec{Ox} هي زاوية الطور الابتدائية θ_2 عند الزمن $t = 0$ فيكون الإحداثي الصادي للمتغير الدائري $\vec{OP_2}$ هي الموجة الجيبية للتيار المتغير .

إذا افترضنا أن المتجه \vec{OP} هو مجموع المتجهين $\vec{OP_1}$ ، $\vec{OP_2}$ فإن الإحداثي الصادي هو مجموع القيم اللحظية لكل من i_1 ، i_2 عند أية لحظة . ويدور المتجه \vec{OP} حول نقطة الأصل بسرعة دائرية ω (rad/s) والإحداثي الصادي له يمثل موجة جيبية هي مجموع التيارين i_1 ، i_2 .

وإذا كان التردد الدائري ω (rad/s) للتيار i_1 يساوي التردد الدائري للتيار i_2 فإن مجموع هذين التيارين يكون له التردد الدائري نفسه لكل من i_1 ، i_2 وتكون القيمة القصوى لمجموع التيارين $I_m(A)$ وزاوية الوجه الابتدائية θ (كما هو مبين بالشكل ٤-١٦) هي قيمة المتجه المحصلة \vec{OP} (جمع $\vec{OP_1}$ ، $\vec{OP_2}$ عند $t = 0$) والزاوية التي يصنعها مع الخط Ox .

ونتيجة لذلك فإنه عند تساوى التردد الدائري ω (rad/s) للتيارين i_1 ، i_2 نجد أنه يمكن تمثيل التيارات $i_1(A)$ ، $i_2(A)$ ، $i(A)$ بالمتجهات $\vec{OP_1}$ ، $\vec{OP_2}$ ، \vec{OP} عند الزمن $(t = 0)$.

سؤال ٦

إذا كان $i_2 = 10\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{3})(A)$ ، $i_1 = 10\sqrt{2} \sin \omega t(A)$

ارسم الأشكال الموجية لقيم ωt الواقعة بين صفر و $2\pi \{rad\}$.

احسب مجموع التيارين $(i = i_1 + i_2)$ باستخدام الرسم البياني ومعادلة القيمة اللحظية و جمع المتجهات .

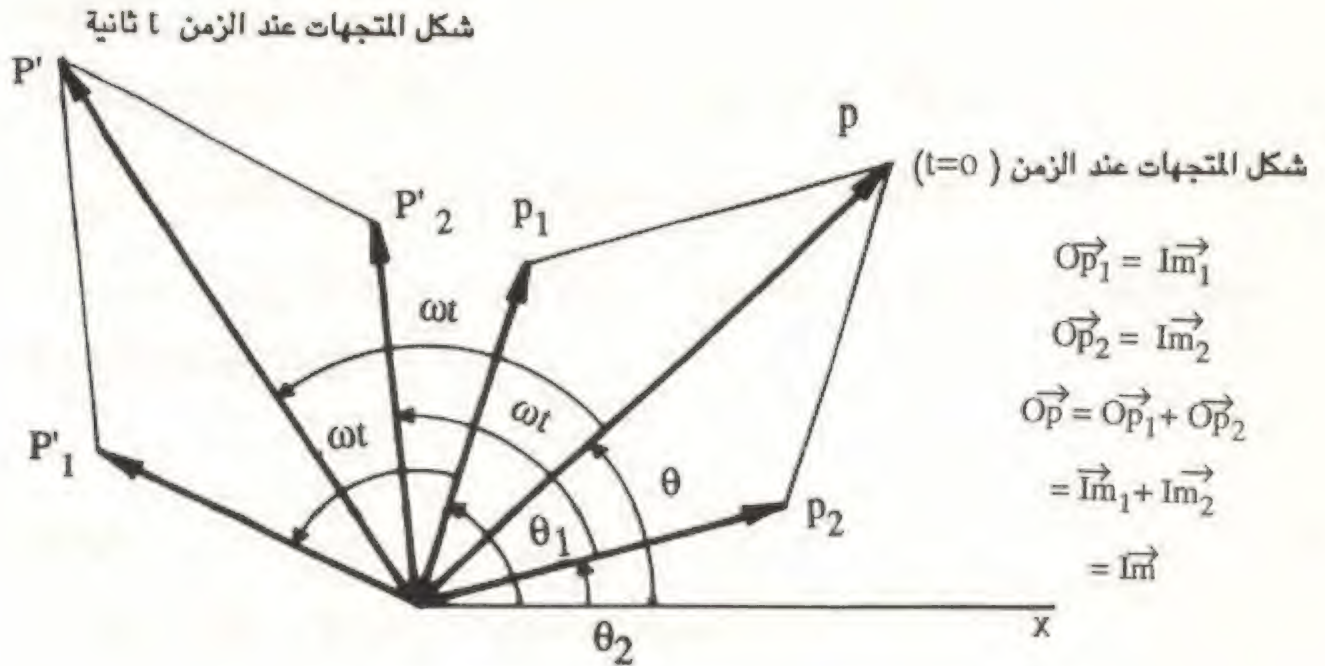
سؤال ٧

إذا كان $i_2 = 10 \sin 2\pi t (A)$ ، $i_1 = 10 \sin \pi t(A)$

ارسم الأشكال الموجية الجيبية لقيم t الواقعة بين صفر و $2 (s)$. إحسب كل

تردد دائري . ارسم الأشكال الموجية لمجموع التيارين $i = i_1 + i_2 (A)$. هل هذا الشكل له موجة جيبية ؟ .

من نتائج سؤال ٧ نجد أن جمع الموجات الجيبية ذات الترددات الدائرية المختلفة لايعطي موجات جيبية . أي إن مجموع التيارين لايمكن حسابه باستخدام المتجهات . ولهذا يتم حساب مجموع التيارين باستخدام الرسم البياني أو معادلة القيمة اللحظية . ويمكن استخدام كل الطرق السابق شرحها لإيجاد مجموع تيارين أو لإيجاد مجموع جهدين .



الشكل ٤ - ١٦ جمع التيارات المتغيرة ذات الموجة الجيبية

باستخدام مجموع المتجهات .

٤ - ٢ الأعداد المركبة Complex numbers

على أساس التردد الدائري نفسه : يمكن إيجاد مجموع التيارات أو مجموع الجهود المتغيرة ذات الموجة الجيبية بسهولة إذا عبرنا عنها في صورة كمية اتجاهية .

في حسابات دائرة التيار المتغير نتعامل كثيراً مع حاصل ضرب وخارج قسمة الجهود أو التيارات ، ولهذا فإن استخدام خواص المتجهات لإيجاد مجموع التيارات أو الجهود يعدّ غير كاف . وحيث أن الأرقام المركبة التخيلية لها خواص شبيهة بالمتجهات، لذا يمكن استخدامها لتمثيل التيار المتغير ذي الموجة الجيبية . أضف إلى ذلك أنه يمكن استخدام عمليات الضرب والقسمة مع الأرقام المركبة التخيلية ويمكن تطبيق ذلك في دائرة التيار المتغير .

في هذا الجزء سنقوم بدراسة الأعداد المركبة التخيلية وخواصها المشابهة لخواص المتجهات.

٤ - ٢ - ١ العدد المركب وخواصه

١ - العدد المركب التخيلي Imaginary units

إذا افترضنا أن (a) هو عدد حقيقي اختياري . وإذا كانت (a) تحقق العلاقة $(a^2 < 0)$ فإن (a) في هذا الحالة ليست عدداً حقيقياً . فمثلاً إذا كانت (a) هي الجذر التربيعي لـ (-1) أي $(\sqrt{-1})$ فإن (a) ليست عدداً حقيقياً ولكنها تسمى في هذه الحالة الوحدة التخيلية، ونرمز لها بالرمز (j) . في بعض كتب الرياضيات يرمز لها بالرمز (i) أما في كتب الهندسة الالكترونية فيستخدم الرمز (j) حتى لا يتعارض مع رمز التيار (i) ومن تعريف الوحدة التخيلية نجد أن :

$$j^2 = -1$$

(4 - 18)

ويمثل العدد المركب في صورة $(a + jb)$ حيث a, b أعداد حقيقية إختيارية و (j) هي الوحدة التخيلية . ويمكن إضافة $(a + jb)$ إلى مجموعة الأعداد .

ب - خواص العدد المركب

١ - العدد المركب $(a + jb)$ يساوى صفر فقط في حالة $(a = b = 0)$ ويعبر عن ذلك كالتى $a + jb = 0$.

٢ - العددان المركبان $(a + jb)$ و $(c + jd)$ يتساويان فقط في حالة $(a = c, b = d)$ ويعبر عن ذلك كالتى $a + jb = c + jd$.

٣ - في العدد المركب $(a + jb)$ إذا كان $(b = 0)$ يصبح العدد حقيقياً وإذا كان $(a = 0)$ يصبح العدد رقماً تخيلياً خالصاً (jb) .

ويمكن التعبير عن الجذر التربيعي للأعداد السالبة بدلالة الوحدة التخيلية (j) كالتى :

$$\sqrt{-2} = j\sqrt{2} \quad , \quad \sqrt{-4} = j2 \quad , \quad -\sqrt{-9} = -j3$$

يضاف إلى ذلك أن الوحدة التخيلية (j) لها الخواص الآتية :

$$j^3 = j^2 \cdot j = -j , \quad j^4 = j^2 \cdot j^2 = 1 , \quad j^5 = j^4 \cdot j = j$$

$$\frac{1}{j} = \frac{-j}{j \cdot (-j)} = -j , \quad \frac{1}{-j} = \frac{j}{-j \cdot j} = j$$

هـ - استخدام قواعد الحساب الأساسية الأربع مع الأعداد المركبة

يمكن استخدام قواعد الحساب الأساسية الأربع الخاصة بالأعداد الحقيقية مع الأعداد المركبة كما هي ومعاملة (j) كحرف ، واستبدال (j^2) بـ -1 . وعند استخدام هذه القواعد مع الأعداد المركبة فإنها تكون كالتالي :

$$\text{الجمع : } (a + jb) + (c + jd) = (a + c) + j(b + d)$$

$$\text{الطرح : } (a + jb) - (c + jd) = (a - c) + j(b - d)$$

$$\begin{aligned} \text{الضرب : } (a + jb)(c + jd) &= ac + jad + jbc + j^2 bd \\ &= (ac - bd) + j(ad + bc) \end{aligned}$$

$$\text{القسمة : } \frac{a + jb}{c + jd} = \frac{(a + jb)(c - jd)}{(c + jd)(c - jd)} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + j \frac{bc - ad}{c^2 + d^2} \quad (c \neq 0, d \neq 0)$$

ويمكن التعبير عن العدد المركب Z كمايلي :

$$\dot{z} = a + jb$$

$$(4 - 19)$$

في المعادلة (4 - 19) الجزء الحقيقي من (\dot{z}) هو (a) والجزء التخيلي من \dot{z} هو (b) والعدد المركب $\bar{\dot{z}}$ القرين لـ \dot{z} هو :

$$\bar{\dot{z}} = a - jb$$

وأثناء القسمة نقوم بضرب كل من البسط والمقام في العدد المركب القرين للمقام لكي يصبح المقام عدداً حقيقياً .

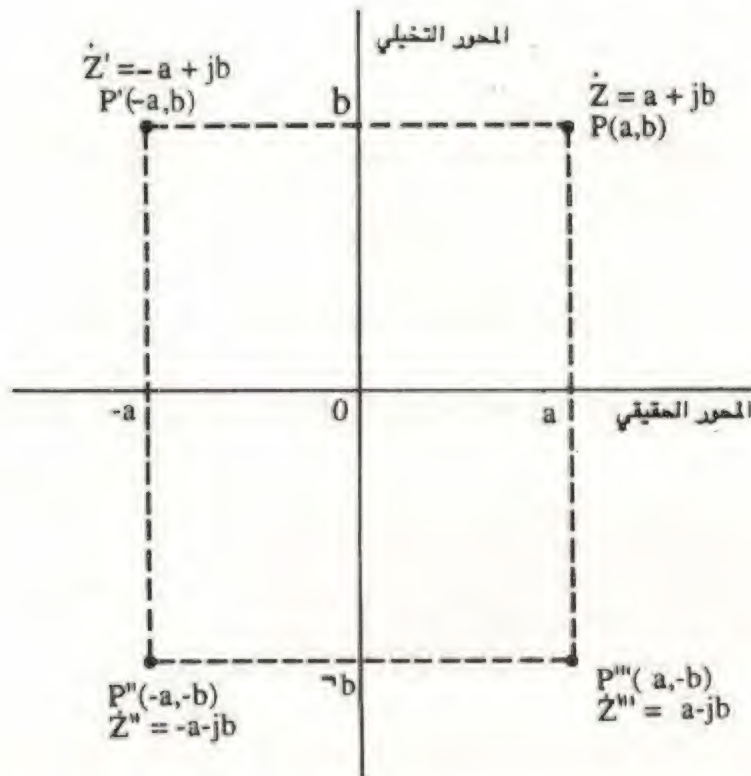
سؤال ٨

احسب ما يلي : 1 - $(9 + j8) + (4 - j4)$ 2 - $(9 - j8) - (3 + j2)$

3 - $(4 - j6) (6 + j8)$ 4 - $\frac{4 - j3}{3 + j4}$

د - المستوى المركب Complex plane

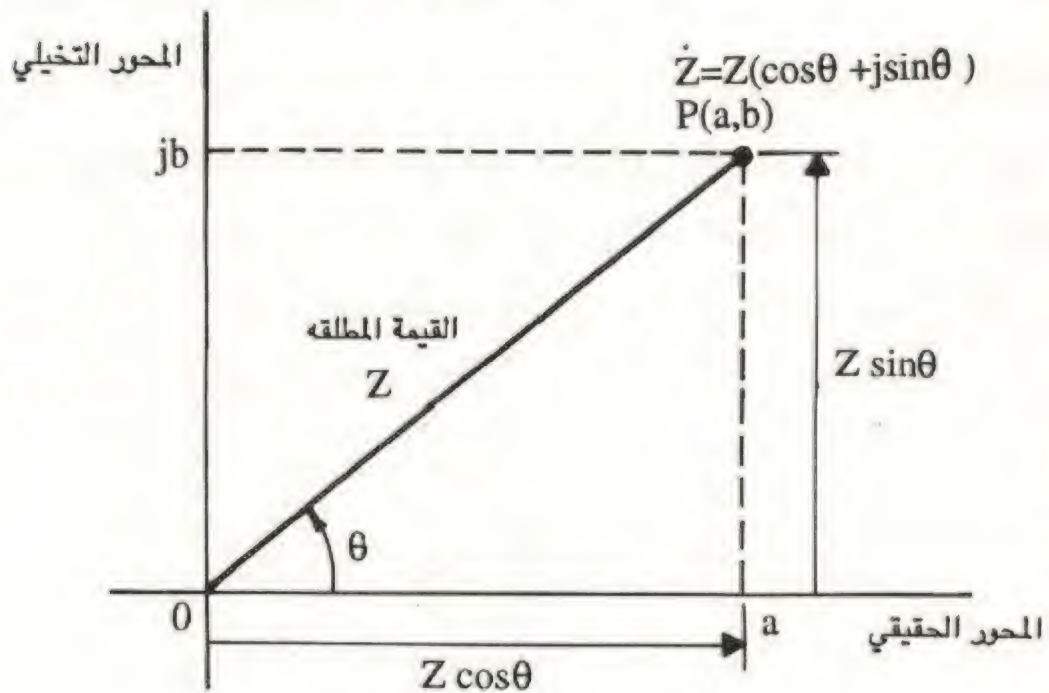
يمكن تمثيل العدد المركب بالنقطة $P(a, b)$ على مستوى الإحداثيات المتعامدة وكل الاعداد المركبة يمكن تمثيلها كنقط على هذا المستوى كما هو مبين في الشكل ٤ - ١٧ . والمستوى المركب هو مستوى يمثل الجزء الحقيقي من العدد المركب على المحور الأفقي، ويمثل الجزء التخيلي من العدد المركب على المحور الرأسي، ويسمى المحور الأفقي بالمحور الحقيقي ويسمى المحور الرأسي بالمحور التخيلي .



الشكل ٤ - ١٧ العدد المركب والمستوى المركب

هـ - القيمة المطلقة والزاوية Absolute value and argument

في الشكل ١٨ - ٤ نجد أن القيمة المطلقة للعدد المركب \dot{Z} هي طول الخط المستقيم OP بين نقطة الأصل O والنقطة P التي تمثل العدد المركب ، ونعبر عنها بالرمز $|\dot{Z}|$. أما زاوية العدد المركب فهي الزاوية θ التي يصنعها \overline{OP} مع المحور الحقيقي والاتجاه الموجب لقياسها هو عكس اتجاه عقارب الساعة ابتداء من المحور الحقيقي .



الشكل ١٨ - ٤ القيمة المطلقة والزاوية

ويمكننا كتابة العلاقات بين القيمة المطلقة وزاوية العدد المركب وبين الأجزاء الحقيقية والتخيلية لهذا العدد كما يلي :

$$a = z \cos \theta , \quad b = z \sin \theta$$

$$z = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \tan \theta = b / a$$

(4 - 20)

ويمكن كتابة العلاقة بين العدد المركب \dot{Z} وقيمه المطلقة Z وزاويته θ كمايلي :

$$\dot{Z} = z \cos \theta + j z \sin \theta = z (\cos \theta + j \sin \theta) \quad (4 - 21)$$

وباستخدام علاقة أويلر (4 - 22) يمكن كتابة العدد المركب \dot{Z} في صورة المعادلة (4 - 23) .

$$\epsilon^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta \quad (4-22)$$

$$\dot{Z} = Z \epsilon^{j\theta} \quad (4-23)$$

والرمز (ϵ) يعبر عن قاعدة اللوغاريتم الطبيعي ، في كتب الرياضيات يستخدم الرمز (e) لهذه القاعدة . أما في كتب الهندسة الإلكترونية فيستخدم الرمز (ϵ) حتى لا يتعارض مع (e) الذي يستخدم رمزاً للقيمة اللحظية للقوة الدافعة الكهربائية .
كما يمكن كتابة العدد المركب \dot{Z} كمايلي :

$$\dot{Z} = Z \angle \theta$$

نستنتج مما سبق أن العدد المركب \dot{Z} يمكن كتابته في أى من الصور الآتية : ($a+jb$) حيث الاحداثيات المتعامدة (a, b) .

و ($z (\cos \theta + j \sin \theta)$) حيث الدوال المثلثية في الاحداثيات القطبية (z, θ) .

مثال ١

احسب القيمة المطلقة والزاوية للعدد المركب $\dot{z} = 3 + j\sqrt{3}$

اكتب هذا العدد المركب في صورة الدوال المثلثية وفي صورة الدالة الأسية $z \epsilon^{j\theta}$

وارسم هذا العدد كنقطة على المستوى المركب .

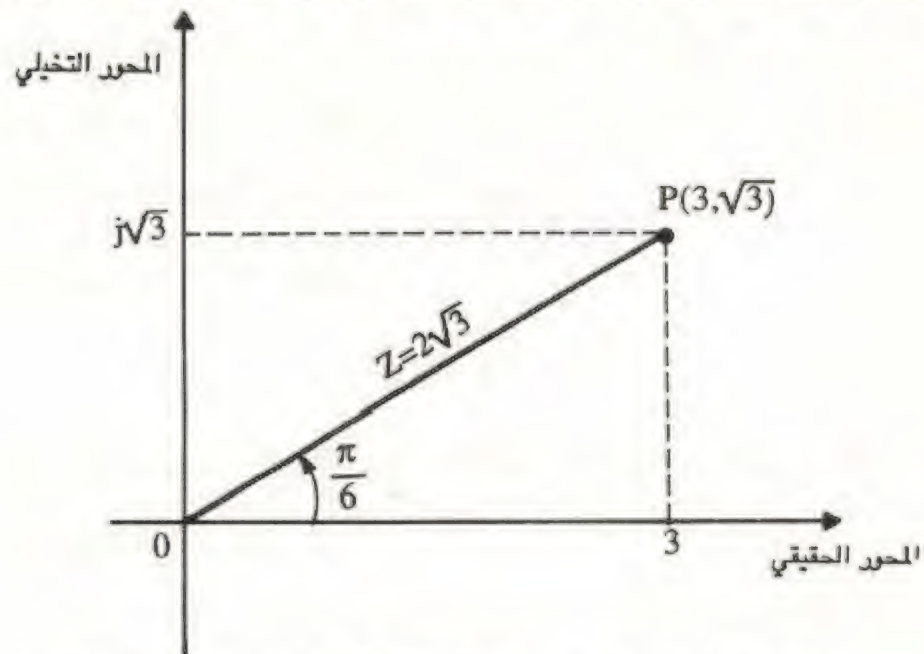
الحل

$$z = |\dot{z}| = \sqrt{(3)^2 + (\sqrt{3})^2} = \sqrt{12} = 2\sqrt{3}$$

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{3}}{3} = \frac{1}{\sqrt{3}} \rightarrow \theta = \frac{\pi}{6} \text{ rad} = 30^\circ$$

$$\dot{z} = 2\sqrt{3} \left(\cos \frac{\pi}{6} + j \sin \frac{\pi}{6} \right)$$

$$\dot{z} = 2\sqrt{3} \in j\pi/6$$



الشكل ٤ - ١٩ موقع النقطة P على المستوى المركب .

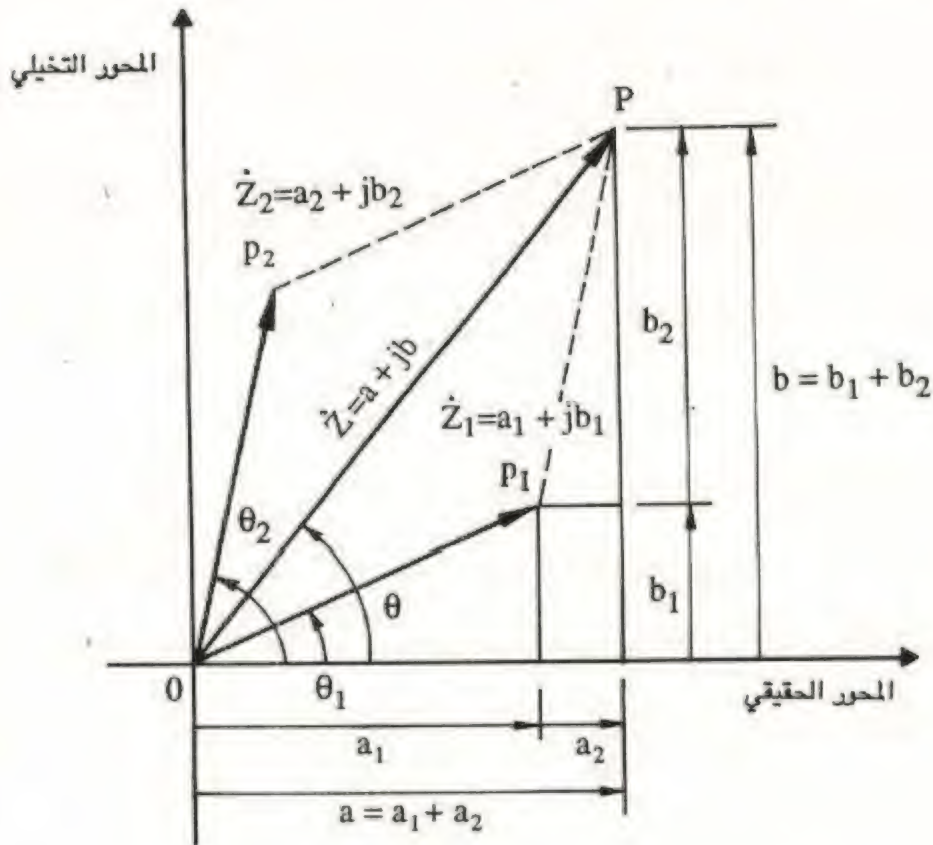
و- تمثيل العدد المركب في صورة متجه

يبين الشكل ٤ - ٢٠ تمثيل العدد المركب $(\dot{z}_1 = a_1 + jb_1)$ في المستوى المركب P_1 ويمثل العدد المركب $(\dot{z}_2 = a_2 + jb_2)$ بالنقطة P_2 . وإذا افترضنا أن العدد المركب \dot{Z} هو مجموع العددين \dot{z}_1, \dot{z}_2 ويمثله النقطة P في المستوى المركب فتكون إحداثياته في اتجاه المحور الحقيقي والمحور التخيلي كمايلي :

$$a = a_1 + a_2,$$

$$b = b_1 + b_2$$

ويكون المتجه \vec{OP} هو مجموع المتجهين \vec{OP}_1 و \vec{OP}_2 والعدد المركب له كل خواص المتجهات السابق ذكرها . ويبين الشكل ٤-٢٠ أن العدد المركب $(\dot{z} = a + jb)$ يمثله المتجه \vec{OP} . ويوضع سهم على الخط \vec{OP} .



الشكل ٤ - ٢٠ تمثيل العدد المركب في صورة متجه

٤ - ٢ - ٢ حاصل ضرب الاعداد المركبة وخارج قسمتها

١- حاصل ضرب الاعداد المركبة

نفترض أن العددين المركبين الاختياريين \dot{Z}_1 , \dot{Z}_2 يمكن تمثيلهما كمايلي :

$$\dot{Z}_1 = z_1 e^{j\theta_1} = z_1 (\cos \theta_1 + j \sin \theta_1) \quad (4-24)$$

$$\dot{z}_2 = z_2 \in^{j\theta_2} = z_2 (\cos \theta_2 + j \sin \theta_2) \quad (4-24)$$

فيمكننا حساب حاصل ضرب العددين \dot{z}_1, \dot{z}_2 كما يلي :

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \dot{z}_1 \dot{z}_2 = z_1 \in^{j\theta_1} \cdot z_2 \in^{j\theta_2} = z_1 (\cos \theta_1 + j \sin \theta_1) \cdot z_2 (\cos \theta_2 + j \sin \theta_2) \\ &= z_1 z_2 \{ (\cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2) + j (\sin \theta_1 \cos \theta_2 + \cos \theta_1 \sin \theta_2) \} \end{aligned}$$

$$\dot{z} = z_1 z_2 \{ \cos (\theta_1 + \theta_2) + j \sin (\theta_1 + \theta_2) \} = z_1 z_2 \in^{j(\theta_1 + \theta_2)} \quad (4-25)$$

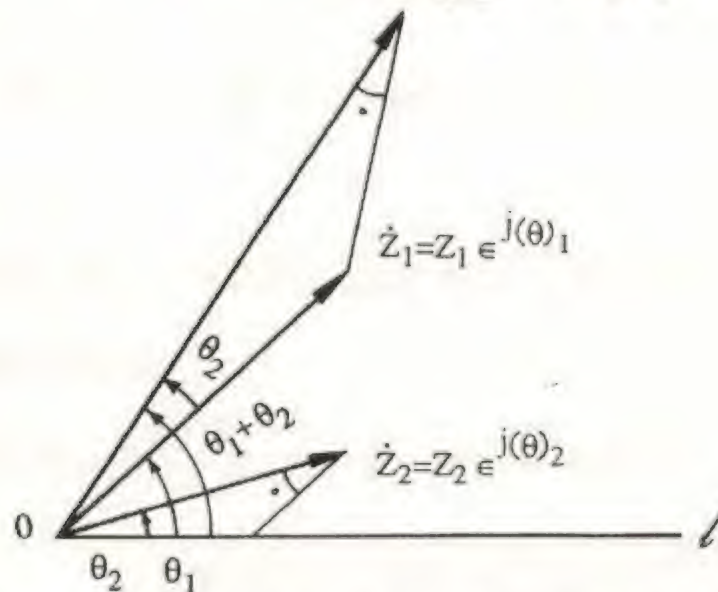
وحيث أنه يمكن كتابته $z \in^{j\theta}$ في صورة $z \angle \theta$ فإن المعادلة (4-25) يمكن كتابتها في الصورة الآتية :

$$\dot{z}_1 \dot{z}_2 = (z_1 \angle \theta_1) (z_2 \angle \theta_2) = z_1 z_2 \angle \theta_1 + \theta_2$$

أي إن القيمة المطلقة لحاصل ضرب عددين مركبين إختياريين \dot{z}_1, \dot{z}_2 هي حاصل ضرب القيمتين المطلقتين لكل منهما، وزاوية حاصل الضرب هي مجموع زاويتي العددين المركبين .

ويبين الشكل ٢١ - ٤ حاصل ضرب عددين مركبين وتمثيله في صورة متجه .

$$\dot{z} = z_1 z_2 \in^{j(\theta_1 + \theta_2)}$$



الشكل ٢١ - ٤ حاصل ضرب عددين مركبين وتمثيله في صورة متجه .

ب - خارج قسمة عددين مركبين

يمكن إيجاد خارج قسمة عددين مركبين \dot{z}_2 , \dot{z}_1 معطيين بالمعادلة (4 - 24) باستخدام العلاقات الآتية :

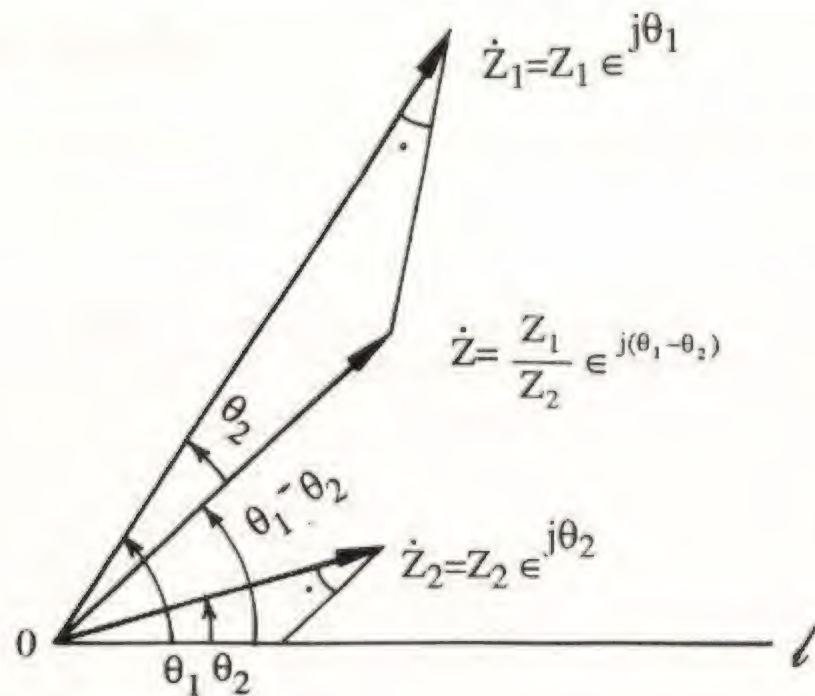
$$\begin{aligned}\frac{\dot{z}_1}{\dot{z}_2} &= \frac{z_1 \in^{j\theta_1}}{z_2 \in^{j\theta_2}} = \frac{z_1 (\cos \theta_1 + j \sin \theta_1)}{z_2 (\cos \theta_2 + j \sin \theta_2)} = \frac{z_1 (\cos \theta_1 + j \sin \theta_1) (\cos \theta_2 - j \sin \theta_2)}{z_2 (\cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_2)} \\ &= \frac{z_1}{z_2} \{ (\cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2) + j (\sin \theta_1 \cos \theta_2 - \cos \theta_1 \sin \theta_2) \} \\ &= \frac{z_1}{z_2} \{ \cos (\theta_1 - \theta_2) + j \sin (\theta_1 - \theta_2) \} = \frac{z_1}{z_2} \in^{j(\theta_1 - \theta_2)} \quad (4 - 26)\end{aligned}$$

وإذا كتبنا $z \in^{j\theta}$ في الصورة $z \angle \theta$ فيمكن كتابة المعادلة (4 - 26) كمايلي :

$$\frac{\dot{z}_1}{\dot{z}_2} = \frac{z_1 \angle \theta_1}{z_2 \angle \theta_2} = \frac{z_1}{z_2} \angle \theta_1 - \theta_2$$

أي إن القيمة المطلقة لخارج قسمة عددين مركبين هي خارج قسمة القيم المطلقة للعددين المركبين، وزاوية خارج قسمة عددين مركبين هي الفرق $(\theta_1 - \theta_2)$ بين زاويتي العددين المركبين .

ويبين الشكل ٤ - ٢٢ خارج قسمة عددين مركبين وتمثيله في صورة متجه .



الشكل ٤ - ٢٢ خارج قسمة عددين مركبين وتمثيله في صورة متجه .

دوران الوحدة التخيلية (j) والمتجه في العدد المركب .

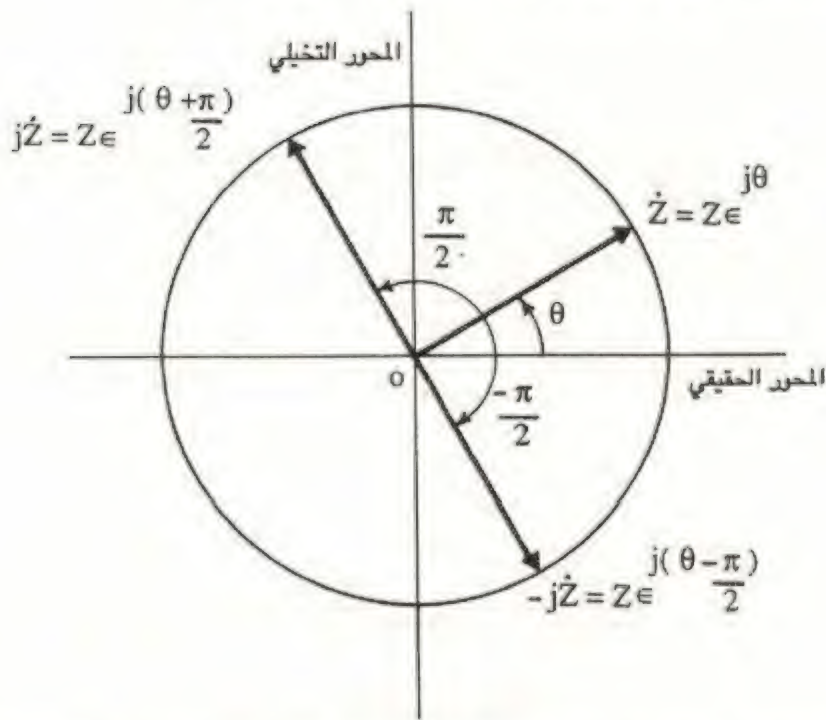
عند ضرب العدد المركب الاختياري $\dot{z} = z \in^{j\theta} = z (\cos \theta + j \sin \theta)$ في الوحدة التخيلية (j) أو في ($-j$) يمكن إيجاد حاصل الضرب كما يلي :

$$\left. \begin{aligned} j &= 1 \left(\cos \frac{\pi}{2} + j \sin \frac{\pi}{2} \right) = \in^{j\pi/2} \\ -j &= 1 \left\{ \cos \left(\frac{-\pi}{2} \right) + j \sin \frac{-\pi}{2} \right\} = \in^{j(-\pi/2)} \end{aligned} \right\} (4-27)$$

ويمكن حساب $j \dot{z}$, $-j \dot{z}$ كما يلي :

$$\left. \begin{aligned} j \dot{z} &= \in^{j\frac{\pi}{2}} \cdot z \in^{j\theta} = z \in^{j(\theta + \frac{\pi}{2})} \\ -j \dot{z} &= \in^{j(\frac{-\pi}{2})} \cdot z \in^{j(\theta)} = z \in^{j(\theta - \frac{\pi}{2})} \end{aligned} \right\} (4-28)$$

والقيمة المطلقة لـ \dot{Z} تساوي القيمة المطلقة لـ Z . وزاوية \dot{Z} تساوي زاوية (\dot{Z}) مضافاً إليها $\frac{\pi}{2}$ (rad) . والقيمة المطلقة لـ $(-\dot{Z})$ تساوي القيمة المطلقة لـ (\dot{Z}) أما زاوية $(-\dot{Z})$ فتساوي زاوية (\dot{Z}) مطروحاً منها $\frac{\pi}{2}$ (rad) .
ويبين الشكل ٢٣ - ٤ هذه العلاقات باستخدام المتجهات .



الشكل ٢٣ - ٤ دوران الوحدة التخيلية (j) والمتجه في العدد المركب .

عند ضرب العدد المركب \dot{Z} في الوحدة التخيلية (j) يحدث دوران للمتجه \dot{Z} في عكس اتجاه عقارب الساعة (الاتجاه الموجب) بمقدار $\pi/2$ (rad) . أما عند ضرب العدد المركب \dot{Z} في $(-j)$ يحدث دوران للمتجه \dot{Z} في اتجاه عقارب الساعة (الاتجاه السالب) بمقدار $\pi/2$ (rad) .

في حسابات الأعداد المركبة يمكن استخدام الإحداثيات المتعامدة أو الدوال المثلثية في عمليات الجمع والطرح، ويمكن استخدام الدوال الأسية في عمليات الضرب والقسمة فتصبح هذه العمليات سهلة .

سؤال ٩

اكتب الأعداد المركبة الآتية في صورة الدوال المثلثية .

$$(1) 2 + j 2 \sqrt{3} \quad (2) j 8 \quad (3) 1 - j \sqrt{3} \quad (4) 4 - j 3$$

سؤال ١٠

احسب المجموع $\dot{C} = \dot{A} + \dot{B}$ والفرق $\dot{D} = \dot{A} - \dot{B}$ للأعداد المركبة :

$$\dot{A} = 50 + j 60 \quad , \quad \dot{B} = 10 + j 20$$

واحسب القيمة المطلقة وزاوية كل من \dot{C} , \dot{D} .

سؤال ١١

احسب المجموع $\dot{V}_s = \dot{V}_1 + \dot{V}_2$ للمتجهين $\dot{V}_2 = 100 \angle^{j0}$ ،

$\dot{V}_1 = 100 \angle^{j\pi/3}$ وبين الناتج في شكل متجهات .

سؤال ١٢

احسب الفرق $\dot{V}_d = \dot{V}_1 - \dot{V}_2$ للمتجهين

$$\dot{V}_1 = 200 \angle^{j0} \quad , \quad \dot{V}_2 = 200 \angle^{j 2\pi/3}$$

وبين الناتج في شكل متجهات .

سؤال ١٣

احسب حاصل ضرب $\dot{V}_m = \dot{V}_1 \dot{V}_2$ وخارج القسمة $\dot{V}_b = \dot{V}_1 / \dot{V}_2$ للمتجهين $\dot{V}_2 = 20 \angle j\pi/6$, $\dot{V}_1 = 100 \angle j\pi/3$

سؤال ١٤

عند ضرب عدد مركب في الوحدة التخيلية (j) تكون القيمة المطلقة لحاصل الضرب هي القيمة المطلقة نفسها للعدد المركب، وتكون زاوية حاصل الضرب مساوية لزاوية العدد المركب بعد إضافة ($\pi/2$ rad) إليها. ما الذي يحدث عند ضرب العدد المركب في (j^2)؟ وما الذي يحدث عند قسمة العدد المركب على (j)؟

٤ - ٣ حساب الدائرة الكهربائية بطريقة الرموز

درسنا من قبل أن العدد المركب له نفس خواص المتجه كما أنه يعد نوعاً من أنواع المتجه. أي إنه يمكن استخدام الأعداد المركبة لتمثيل الجهود والتيارات الجيبية المتغيرة، وكذلك حساب مجموع الجهود ومجموع التيارات.

في هذا الجزء سوف نلقى الضوء على طريقة الرموز التي تستخدم الأعداد المركبة لحساب العلاقة بين الجهد والتيار جبرياً. وبهذه الطريقة يمكن فهم الخواص الكهربائية للدائرة الأساسية للتيار المتغير.

عند تمثيل الأعداد المركبة \dot{z}_1 , \dot{z}_2 بالدوال الأسية تكون كالاتي :

$$\dot{z}_1 = z_1 e^{j\theta_1} , \dot{z}_2 = z_2 e^{j\theta_2} ,$$

$$\dot{z}_1 \dot{z}_2 = z_1 z_2 e^{j(\theta_1 + \theta_2)} , \frac{\dot{z}_1}{\dot{z}_2} = \frac{z_1}{z_2} e^{j(\theta_1 - \theta_2)} , (\dot{z}_2 \neq 0)$$

أي إن ضرب الأعداد المركبة وقسمتها في الصورة الأسية يتم فيها إضافة وطرح الزاوية، أضف إلى ذلك أن العدد المركب المكتوب في الصورة الأسية $j(\omega t + \theta) \in$ لا يتغير عند إيجاد تفاضله أو تكامله بالنسبة للزمن t . ولهذا فإن الأعداد المركبة تعد أداة مفيدة جداً للحسابات الجبرية البسيطة والعلاقات بين الجهد والتيار في الدوائر الكهربائية المعقدة. راجع أيضاً المعادلات (4 - 37)، (4 - 44) والملحق.

٤ - ٣ - ١ تمثيل التيار المتغير الجيبي بالأعداد المركبة

كما درسنا في الجزء السابق يمكن تمثيل التيار المتغير ذي الموجة الجيبية باستخدام المتجهات، كما يمكن إيجاد مجموع التيارات المتغيرة أيضاً باستخدام المتجهات. ودرسنا أيضاً استخدام الأعداد المركبة مثل المتجهات في عمليات مماثلة.

حيث إن التيار المتغير ذو الموجة الجيبية: $i = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \theta)$ (A)

ينظر الجزء التخيلي: $\sqrt{2} I \sin(\omega t + \theta)$

من العدد المركب

$$\sqrt{2} I e^{j(\omega t + \theta)} = \sqrt{2} I \{ \cos(\omega t + \theta) + j \sin(\omega t + \theta) \}$$

عند إدارة المتجه [الذي يمثل العدد المركب $\sqrt{2} I e^{j\theta}$ وقيمه تساوي $\sqrt{2}$ مضروبة في قيمة العدد المركب $(I e^{j\theta})$] حول النقطة O بسرعة دائرية ω (rad) كما في الشكل ٤ - ٢٤ فإن الجزء التخيلي $\sqrt{2} I \sin(\omega t + \theta)$ للعدد المركب

$\sqrt{2} I \{ \cos(\omega t + \theta) + j \sin(\omega t + \theta) \}$ يمثل التيار المتغير $i \{A\}$ الجيبي الموجة.

ويمكن تمثيل الجهد المتغير الجيبي الموجة بالأعداد المركبة مثل التيار المتغير. ومجموع تيارين ذوي موجة جيبية يساوي الجزء التخيلي لمجموع الأعداد المركبة المناظرة لهذين التيارين. ومن ثم فإنه يتم تمثيل مجموع التيارات المتغيرة الجيبية بالعدد المركب وعلى الأخص بالجزء التخيلي منه، وينطبق ذلك أيضاً على مجموع الجهود الجيبية المتغيرة.

تبين المعادلات الآتية القيم اللحظية للجهد، والتيار المتغير الجيبي، وتمثيلها بالأعداد المركبة

$$v = \sqrt{2} V \sin(\omega t + \theta_1)$$

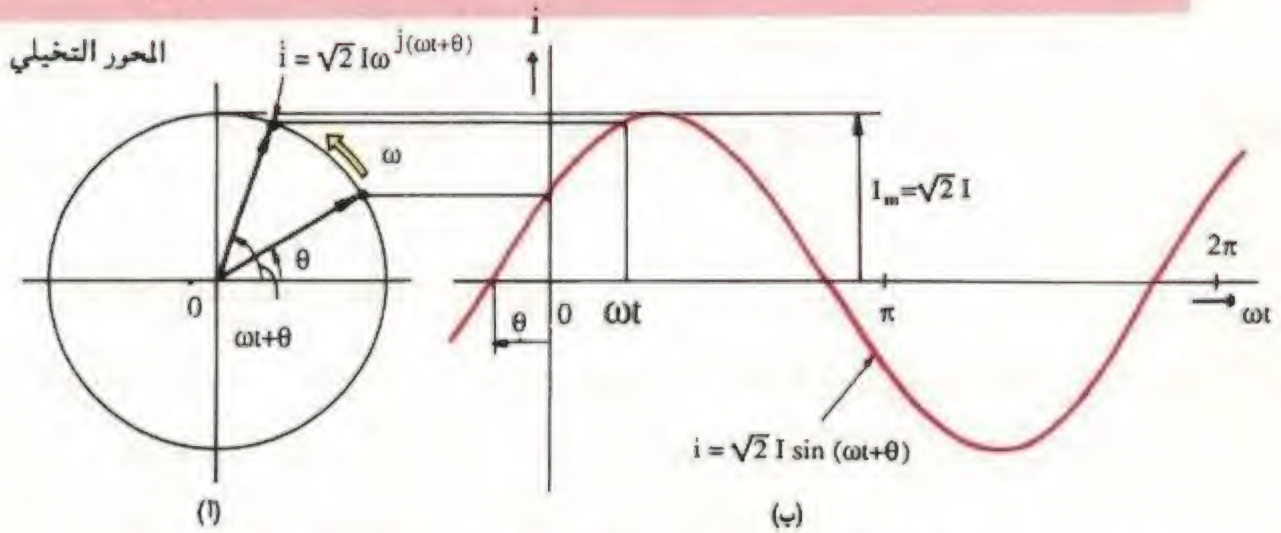
$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \theta_2)$$

$$\dot{v} = \sqrt{2} V \{ \cos(\omega t + \theta_1) + j \sin(\omega t + \theta_1) \} = \sqrt{2} V e^{j\omega t} e^{j\theta_1}$$

$$\dot{i} = \sqrt{2} I \{ \cos(\omega t + \theta_2) + j \sin(\omega t + \theta_2) \} = \sqrt{2} I e^{j\omega t} e^{j\theta_2}$$

حيث إن الممانعة $(Z = \dot{v} / \dot{i})$ هي متغير يعبر عن صعوبة تدفق التيار المتغير، وتشبه المقاومة بالنسبة للتيار المستمر. وتكتب الممانعة \dot{Z} في الصورة الآتية :

$$\dot{Z} = \frac{\dot{v}}{\dot{i}} = \frac{\sqrt{2} V e^{j\omega t} e^{j\theta_1}}{\sqrt{2} I e^{j\omega t} e^{j\theta_2}} = \frac{V}{I} e^{j(\theta_1 - \theta_2)} = \frac{V}{I} \{ \cos(\theta_1 - \theta_2) + j \sin(\theta_1 - \theta_2) \} \quad (4-29)$$



الشكل ٤ - ٢٤ التناظر بين العدد المركب والتيار المتغير الجيبي الموجة

وكل من الجهد \dot{v} والتيار \dot{i} داله في الزمن t ، وإذا افترضنا أن التردد الدائري (ω) لكل من \dot{v} ، \dot{i} متساوٍ؛ فإن الممانعة \dot{Z} لا تعتمد على الزمن t وذلك لشطب $e^{j\omega t}$ من كل من البسط والمقام. والزاوية بين المتجهات \dot{i} ، \dot{v} لا تتغير مع الزمن.

في دائرة التيار المتغير يمكن تحليل العلاقة بين القيم الفعالة للجهد والتيار وزاوية الطور الابتدائية باستخدام قيمة الممانعة Z وفي هذه العلاقات نستخدم $\dot{V}/\sqrt{2}$ بدلاً من V .

$$\begin{aligned}\dot{V} &= V e^{j\theta_1} = V (\cos \theta_1 + j \sin \theta_1) \\ \dot{I} &= I e^{j\theta_2} = I (\cos \theta_2 + j \sin \theta_2) \\ Z &= \frac{V}{I} e^{j(\theta_1 - \theta_2)} \\ &= \frac{V}{I} \{ \cos (\theta_1 - \theta_2) + j \sin (\theta_1 - \theta_2) \} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}}\end{aligned} \quad (4 - 30)$$

أي إن الجهد \dot{V} يمكن كتابته في صورة عدد مركب ، والقيمة الفعالة لهذا الجهد هي V كقيمة مطلقة وزاوية الوجه الابتدائية هي θ_1 . وينطبق ذلك أيضاً على التيار . وباستخدام المعادلة (4 - 30) تحسب قيمة Z باستخدام الجهد \dot{V} والتيار \dot{I} المار في الممانعة .

٤ - ٣ - ٢ وظائف المقاومة والملف والمكثف في دائرة التيار المتغير الجيبي

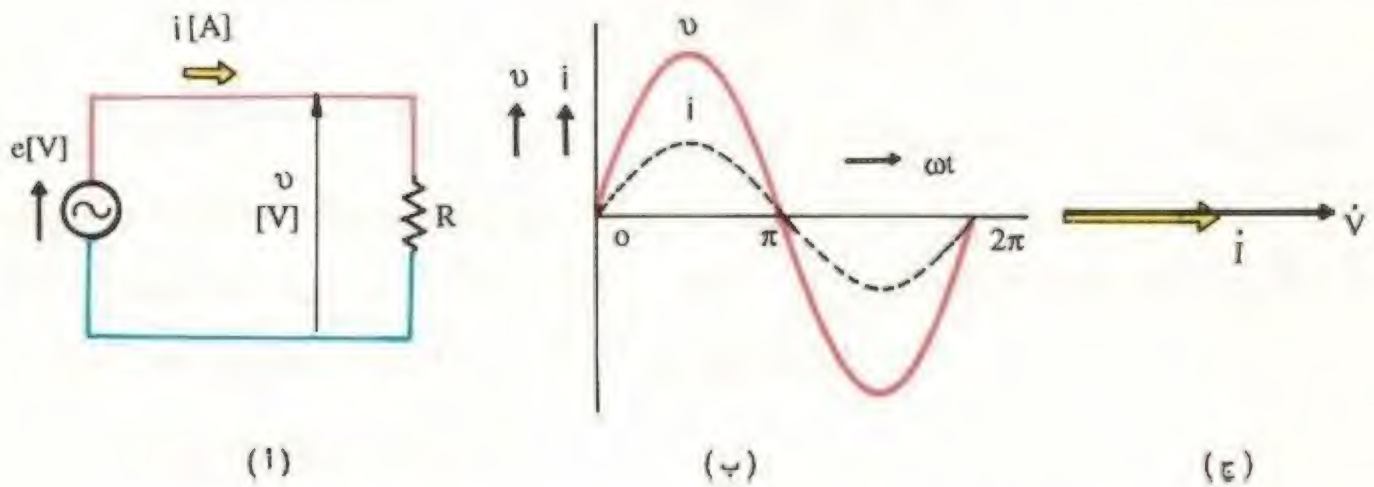
أ - الدائرة المكونة من المقاومة R فقط

يوضح الشكل ٤ - ٢٥ (أ) توصيل القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة الجيبية $e(V)$ في دائرة مكونة من المقاومة $R (\Omega)$ فيمر فيها التيار $i(A)$ طبقاً لقانون أوم . وتكون العلاقة بين القوة الدافعة الكهربائية $e(V)$ والتيار $i(A)$ كما يلي :

$$\begin{aligned}e &= \sqrt{2} E \sin \omega t \\ i &= \frac{e}{R} = \sqrt{2} \frac{E}{R} \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t\end{aligned} \quad (4 - 31)$$

يتبين من المعادلة (31-4) أن التيار i (A) له موجة جيبية وزاويته تساوي زاوية القوة الدافعة الكهربائية e (V).

بمرور التيار i (A) في المقاومة R (Ω) يتولد فرق جهد v (V) في اتجاه مرور التيار نفسه على المقاومة كما هو مبين في الشكل ٤ - ٢٥ (أ).



الشكل ٤ - ٢٥ الجهد والتيار في دائرة مكونة من مقاومة فقط .

حيث إن العلاقة بين v , e هي $(e = v)$ طبقاً للقانون الثاني لكيرشوف .
بالنسبة للقيم الفعالة نجد أن $E = V$ وتكون المعادلات الخاصة بالجهد v (V) والتيار i (A) كما يلي :

$$v = iR = \sqrt{2} V \sin \omega t$$

$$i = \frac{v}{R} = \sqrt{2} \frac{V}{R} \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t$$

$$\left. \begin{array}{l} v = iR = \sqrt{2} V \sin \omega t \\ i = \frac{v}{R} = \sqrt{2} \frac{V}{R} \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t \end{array} \right\} (4 - 32)$$

وتبين المعادلة (32-4) أن قانون أوم ينطبق على العلاقة بين القيم الفعالة V , I للجهد والتيار على الترتيب مثل العلاقة نفسها بين الجهد والتيار في دائرة التيار المستمر .

$$I = \frac{E}{R} = \frac{V}{R}$$

(4 - 33)

وعند كتابة هذه العلاقات باستخدام الدوال الأسية تكون كما يلي :

$$\dot{V} = V e^{j\omega t}$$

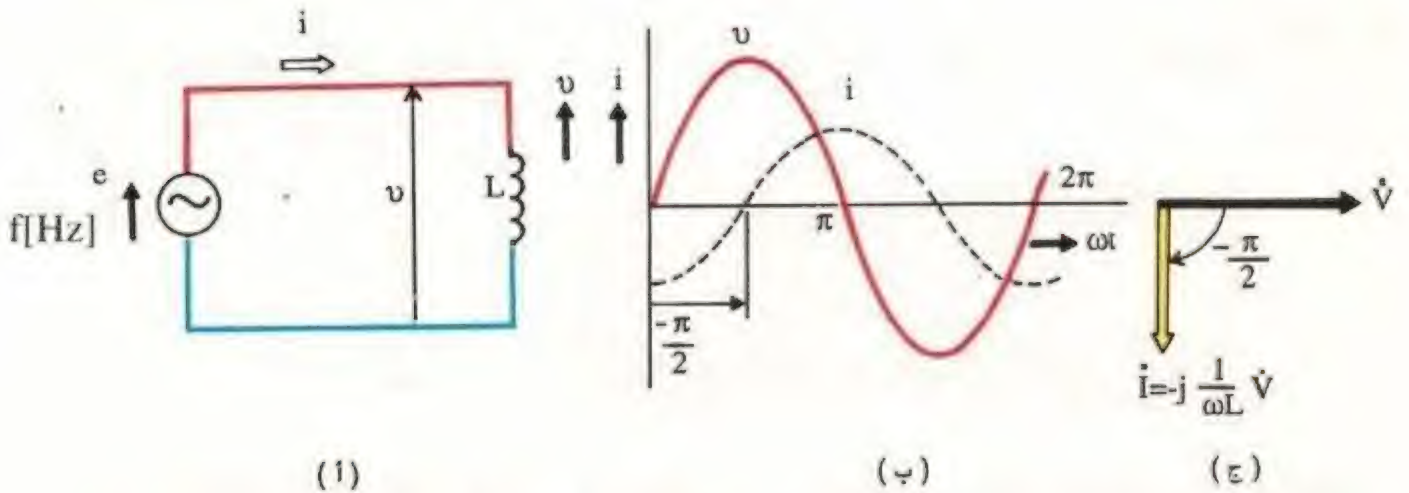
$$\dot{I} = \frac{V}{R} e^{j\omega t} = I e^{j\omega t}$$

(4 - 34)

من المعادلات (4 - 31) و (4 - 32) يتضح أن الجهد والتيار المار في مقاومة لهما طور القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة الجيبية المتصلة بالمقاومة . ويبين الشكل ٤ - ٢٥ (ب) أشكال الموجة لكل من \dot{I} , \dot{V} أما الشكل ٤ - ٢٥ (ج) فيبين شكل المتجهات لكل من \dot{I} , \dot{V} ويخص هذا الشكل الأعداد المركبة \dot{I} , \dot{V} في المعادلة (4 - 34) .

ب - الدائرة المكونة من ملف L

يبين الشكل ٤ - ٢٦ (أ) توصيل القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة الجيبية $e(V)$ إلى الملف $L(H)$ فيمر التيار $i(A)$ وتتغير قيمة هذا التيار دورياً ، ويتسبب في توليد قوة دافعة كهربائية $e_L(V)$ ذاتية على الملف كما درسنا في الفصل الثاني .



الشكل ٤ - ٢٦ الجهد والتيار في دائرة مكونة من ملف فقط

والمعادلات الخاصة بالقوة الدافعة الكهربائية $e(V)$ لمصدر القدرة والقوة الدافعة الذاتية $e_L(V)$ هي كما يلي :

$$e = \sqrt{2} E \sin \omega t \quad (V)$$

$$e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (V)$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} (4 - 35)$$

وطبقاً للقانون الثاني لكيرشوف نجد أن $e + e_L = 0$ إذن

$$e = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (V)$$

(4 - 36)

نحصل على العلاقة الآتية :

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{e}{L} = \sqrt{2} \frac{E}{L} \sin \omega t$$

وعند إجراء تكامل لهذه العلاقة بالنسبة للزمن نحصل على معادلة التيار $i(A)$:

$$i = \sqrt{2} \frac{E}{\omega L} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

(4 - 37) *

* من تعريف التكامل

$$i = \sqrt{2} \frac{E}{L} \int \sin \omega t \, dt = -\sqrt{2} \frac{E}{\omega L} \cos \omega t = \sqrt{2} \frac{E}{\omega L} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

ويمكن كتابة ذلك في صورة الدوال الأسية كما يلي :

$$i = \sqrt{2} \frac{E}{L} \int e^{j\omega t} \, dt = \sqrt{2} \frac{E}{j\omega L} e^{j\omega t} = \sqrt{2} \frac{E}{\omega L} (-j e^{j\omega t}) = \sqrt{2} \frac{E}{\omega L} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})}$$

لاحظ أن شكل الدالة $e^{j\omega t}$ لم يتغير نتيجة للتكامل بالنسبة للزمن .

راجع أيضاً المعادلات (10) ، (11) في ملحق الكتاب

من المعادلة (37 - 4) نجد أن التيار $i(A)$ المتغير الجيبي يتأخر في زاوية الوجه عن القوة الدافعة الكهربائية $e(V)$ بمقدار $\frac{\pi}{2}$ (rad)

والجهد $v(V)$ على الملف المبين في شكل ٤ - ٢٦ (أ) يساوي e . ونجد أن القيمة المؤثرة للجهد v والقيمة المؤثرة للقوة الدافعة الكهربائية متساويتان. وتكون المعادلات الخاصة بالجهد $v(V)$ والتيار $i(A)$ في الملف كما يلي :

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{2} V \sin \omega t \\ i &= \sqrt{2} \frac{V}{\omega L} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \sqrt{2} I \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (4-38)$$

من المعادلة (38 - 4) يتبين أن العلاقة بين القيم المؤثرة للجهد والتيار كما يلي :

$$\omega L I = V$$

$$\frac{V}{I} = \omega L \quad (4-39)$$

الممانعة الحثية لهذه الدائرة المكونة من ملف فقط هي V/I والتي تساوي ωL وتعتبر عن صعوبة تدفق التيار. ويرمز لهذه الكمية بالرمز X_L ووحدة قياسه هي (Ω) وقيمة X_L هي :

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (\Omega) \quad (4-40)$$

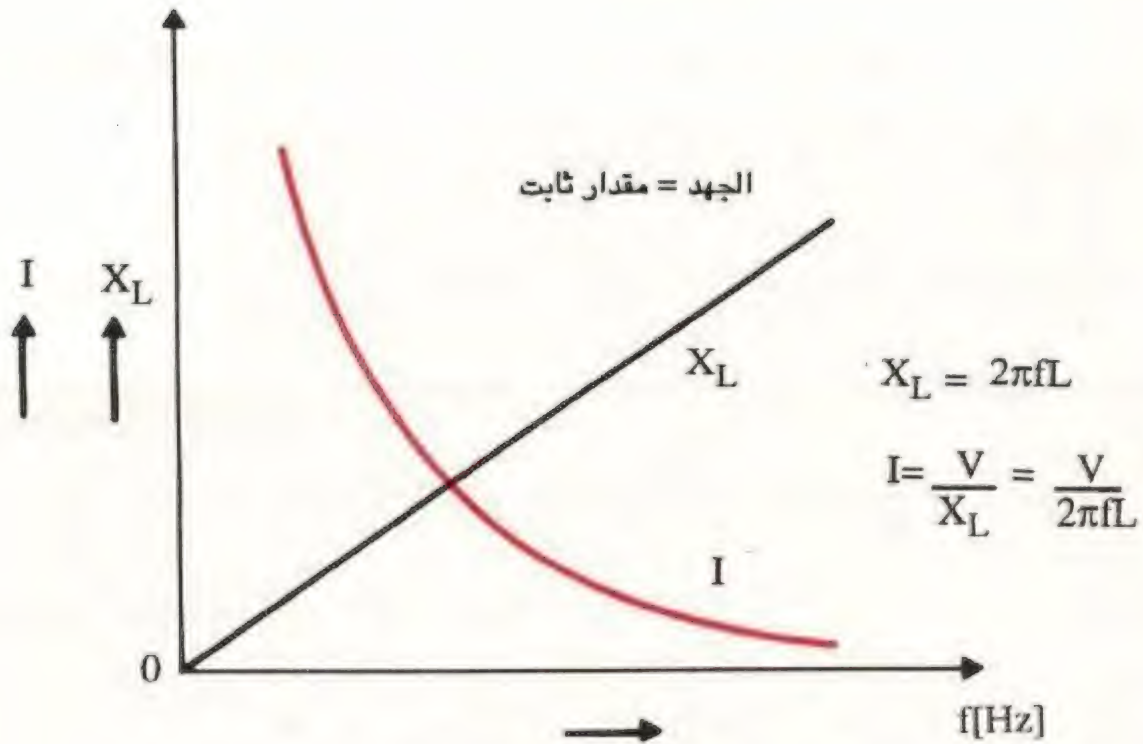
باستخدام المعادلات (48 - 4)، (49 - 4) يمكن كتابة الممانعة الحثية X_L بمعلومية الدوال الأسية والأعداد المركبة كما يلي :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= V e^{j\omega t} = \omega L I e^{j\omega t} \\ \dot{I} &= I e^{j(\omega t - \pi/2)} \\ \dot{X}_L &= \frac{\dot{V}}{\dot{I}} = \frac{\omega L I e^{j\omega t}}{I e^{j(\omega t - \pi/2)}} = \omega L e^{j\pi/2} = j X_L \end{aligned} \quad (4-41)$$

أي أنه في الدائرة المكونة من ملف فقط يتأخر التيار في الملف عن الجهد بزاوية مقدارها $\frac{\pi}{2}$ (rad) . ويسمى هذا التيار (التيار المتأخر) . ويتقدم الجهد على التيار بزاوية مقدارها $\pi/2$ (rad)

تبين أشكال ٢٦ - ٤ (ب) ، ٢٦ - ٤ (ج) الاشكال الموجية للجهد V والتيار وأشكال المتجهات I ، V على الترتيب .

تناسب الممانعة الحثية X_L للملف مع تردد مصدر القدرة f (Hz) وعند استخدام قيمة ثابتة للجهد فإن التيار I (A) المار في الدائرة يتناسب عكسيا مع التردد f) ويبين الشكل ٢٧ - ٤ الخواص الترددية لكل من I ، X_L .



الشكل ٢٧ - ٤ الخواص الترددية لكل من I ، X_L

ح - الدائرة المكونة من مكثف C فقط

يبين شكل ٤ - ٢٨ (أ) توصيل القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة الجيبية $e(V)$ إلى المكثف $C(F)$. والجهد $v(V)$ على المكثف C (والذي يساوي القوة الدافعة الكهربائية $e(V)$ وقيمه المؤثرة تساوي القيمة المؤثرة للقوة الدافعة الكهربائية) يمكن كتابة معادلته في الصورة الآتية :

$$e = \sqrt{2} E \sin \omega t \quad (V)$$

$$v = \sqrt{2} V \sin \omega t \quad (V) \quad (4-42)$$

يخزن المكثف C الشحنة $q (C)$ التي تتناسب مع الجهد $v (V)$ كما درسنا في الفصل الثالث :

$$q = Cv = \sqrt{2} CV \sin \omega t \quad (V) \quad (4-43)$$

تتغير الشحنة q دورياً ويمر التيار $i \{A\}$ في الدائرة كما في المعادلة :

$$\begin{aligned} i &= \frac{\Delta q}{\Delta t} = C \frac{\Delta V}{\Delta t} = C \frac{\Delta}{\Delta t} (\sqrt{2} V \sin \omega t) \\ &= \sqrt{2} \omega CV \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \sqrt{2} I \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (A) \quad (4-44)^* \end{aligned}$$

* طبقاً لتعريف التفاضل

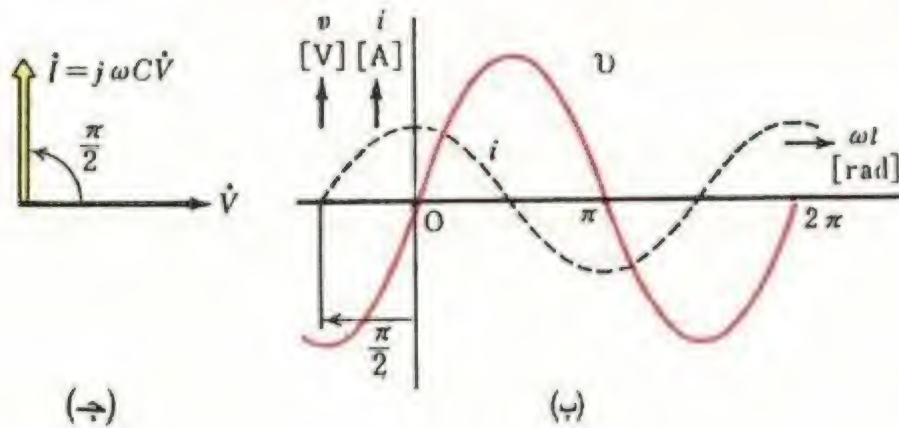
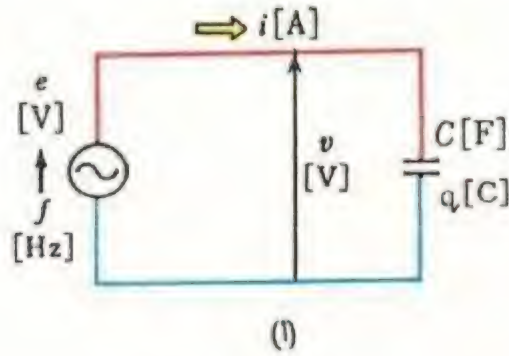
$$i = \sqrt{2} CV \frac{d}{dt} \sin \omega t = \sqrt{2} \omega CV \cos \omega t = \sqrt{2} \omega CV \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

ويمكن كتابة ذلك في صورة الدوال الأسية كما يلي :

$$i = \sqrt{2} CV \frac{d}{dt} e^{j\omega t} = j\sqrt{2} \omega CV e^{j\omega t} = \sqrt{2} \omega CV e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})}$$

ويلاحظ أن الدالة $e^{j\omega t}$ لا يتغير شكلها عند إجراء عملية التفاضل بالنسبة للزمن.

راجع أيضاً المعادلات (7) ، (9) في ملحق الكتاب



شكل ٤ - ٢٨ الجهد والتيار في دائرة مكونة من مكثف فقط .

ويمكن استنتاج المعادلة الآتية من المعادلة (4 - 44)

$$\omega CV = I$$

$$\frac{V}{I} = \frac{1}{\omega C} \quad (4 - 45)$$

أي إن ممانعة المكثف هي $(1 / \omega C)$ تعبر عن صعوبة تدفق التيار مثل ما سبق قوله عن المقاومة والممانعة الحثية. ورمز ممانعة المكثف هو X_C ووحدة قياسه هي (Ω)

وقيمة X_C هي :

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} [\Omega] \quad (4 - 46)$$

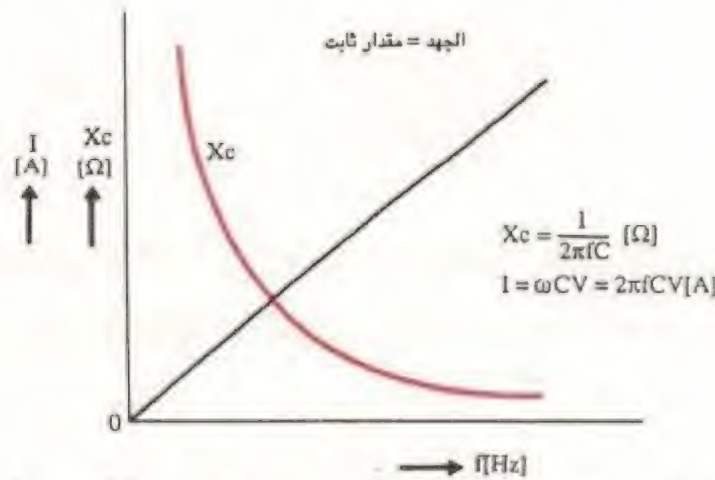
وباستخدام المعادلات (4 - 42) , (4 - 44) يمكن تمثيل مفاعلة المكثف X_C عن طريق الأعداد المركبة والدوال الأسية كما يلي :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= V e^{j\omega t} \\ \dot{I} &= \omega C V e^{j\omega t} = I e^{j\omega t} \\ \dot{X}_C &= \frac{\dot{V}}{\dot{I}} = \frac{V e^{j\omega t}}{\omega C V e^{j\omega t}} = \frac{1}{\omega C} e^{j(-\pi/2)} = -jX_C \end{aligned} \quad (4 - 47)$$

أي إنه في الدائرة التي تحتوي على مكثف فقط يتقدم التيار على الجهد بزاوية مقدارها $\pi/2(\text{rad})$ ويسمى التيار (التيار المتقدم) . وفي هذه الحالة يتأخر الجهد عن التيار بزاوية مقدارها $\pi/2(\text{rad})$.

وتبين الأشكال ٢٨ - ٤ (ب) و ٢٨ - ٤ (ج) الأشكال الموجية للجهد \dot{V} والتيار \dot{I} وأشكال المتجهات لكل من I , V على الترتيب.

وتتناسب مفاعلة المكثف X_C عكسياً مع تردد مصدر القدرة $f(\text{Hz})$ وعند استخدام جهد ثابت فإن التيار $I(\text{A})$ المار في الدائرة يتناسب طردياً مع التردد كما هو موضح في الشكل ٢٩ - ٤ .



الشكل ٢٩ - ٤ الخواص الترددية لـ X_C , I

د- دائرة توالي R L C

يبين الشكل ٤ - ٣٠ (أ) دائرة تحتوي على C, L, R موصلة على التوالي يغذيها قوة دافعة كهربية متغيرة جيبية $e(V)$ فيمر تيار متغير جيبى $i(V)$ طبقاً للمعادلة :

$$i = \sqrt{2} I \sin \omega t (A) \quad (4 - 48)$$

وعندما نفترض أن الجهد المتولد على أطراف المقاومة R والملف L والمكثف C هي V_R, V_L, V_C على الترتيب ، وأن الجهد الموجود على الدائرة كلها هو $V(V)$ كما في المعادلات الآتية :

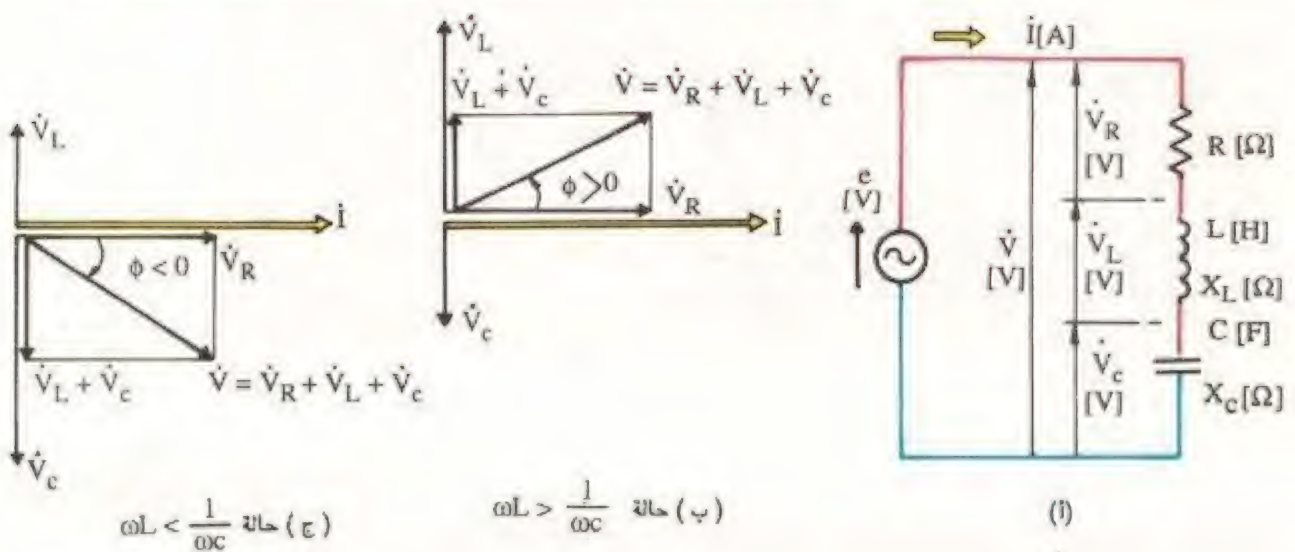
$$v_R = \sqrt{2} V_R \sin \omega t = \sqrt{2} R I \sin \omega t$$

$$v_L = \sqrt{2} V_L \sin (\omega t + \frac{\pi}{2}) = \sqrt{2} X_L I \sin (\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$v_C = \sqrt{2} V_C \sin (\omega t - \frac{\pi}{2}) = \sqrt{2} X_C I \sin (\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$v = v_R + v_L + v_C = \sqrt{2} V \sin (\omega t + \phi)$$

(4 - 49)



الشكل ٤ - ٣٠ الجهد والتيار في دائرة توالي RLC

وباستخدام الدوال الأسية يمكن كتابة المعادلات (4 - 48) , (4 - 49)

كما يلي :

$$\begin{aligned}
 \dot{I} &= I e^{j0} = I (A) \\
 \dot{V}_R &= V_R e^{j0} = RI e^{j0} = RI (V) \\
 \dot{V}_L &= V_L e^{j\pi/2} = X_L I e^{j\pi/2} = jX_L I (V) \\
 \dot{V}_C &= V_C e^{j(-\pi/2)} = X_C I e^{j(-\pi/2)} = -jX_C I (V) \\
 \dot{V} &= \dot{V}_R + \dot{V}_L + \dot{V}_C = V e^{j\phi} \\
 &= RI e^{j0} + X_L I e^{j\pi/2} + X_C I e^{j(-\pi/2)} \\
 &= RI + j(X_L I - X_C I) (V)
 \end{aligned}
 \tag{4 - 50}$$

وتبين الأشكال ٤ - ٣٠ (ب) ، ٤ - ٣٠ (ج) أشكال المتجهات للعلاقات بين الجهد والتيار في هذه المعادلة . ومن ثم يمكن كتابة العلاقة بين I , V كما يلي :

$$\begin{aligned}
 V &= |\dot{V}| = \sqrt{\dot{V}_R^2 + (\dot{V}_L - \dot{V}_C)^2} = \sqrt{(RI)^2 + (X_L I - X_C I)^2} \\
 &= I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = I \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \\
 \tan \phi &= \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}
 \end{aligned}
 \tag{4 - 51}$$

ومن المعادلة (4 - 51) :

$$\frac{V}{I} = Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} (\Omega) \tag{4 - 52}$$

ويمكن استنتاج ($\dot{Z} = \dot{V} / \dot{I}$) الممانعة من المعادلة (4 - 50) كما يلي :

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}} = \frac{V \angle j\phi}{I \angle j0} = Z \angle j\phi = R + j(X_L - X_C) = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (\Omega) \quad (4 - 53)$$

وكما ذكرنا من قبل فإن R ، $X_L = j\omega L$ ، $X_C = -j \frac{1}{\omega C}$ هي ممانعة الدائرة المكونة من مقاومة فقط و ملف فقط ، ومكثف فقط على الترتيب .

الزاوية ϕ في المعادلة (4 - 53) هي زاوية الجهد بالنسبة للتيار، وتحسب من المعادلة (4 - 51) وتسمى زاوية الممانعة أو زاوية معامل القدرة .

في المعادلات (4 - 52) و (4 - 53) وفي حالة ($\omega L > \frac{1}{\omega C}$) تكون الدائرة حثية وتكون زاوية الممانعة ϕ موجبة، ويكون التيار متأخراً عن الجهد بمقدار زاوية الممانعة ϕ . وهذه العلاقة يوضحها الشكل ٤ - ٣٠ (ب) في صورة متجهات . أما في حالة ($\omega L < \frac{1}{\omega C}$) فإن الدائرة تكون دائره ذات سعة (شبيهة بالمكثف) وتكون زاوية الممانعة ϕ سالبة ويكون التيار سابقاً للجهد بمقدار القيمة المطلقة لزاوية الممانعة ϕ . وهذه العلاقة يوضحها الشكل ٤ - ٣٠ (ج) في صورة متجهات .

وفي حالة ($\omega L = \frac{1}{\omega C}$) يحدث رنين التوالي ، ويكون الجهد والتيار لهما زاوية الطور نفسها .

في دائرة توالي RL تستخدم المعادلات (4 - 52) و (4 - 53) بعد وضع ($X_C = 0$) وفي دائرة توالي RC تستخدم المعادلات (4 - 52) و (4 - 53) بعد وضع ($X_L = 0$) .

سؤال ١٥

احسب ممانعة الملف X_L إذا كانت $L = 0.5 \text{ H}$ ، $f = 50 \text{ Hz}$

سؤال ١٦

احسب ممانعة الملف X_C إذا كانت $C = 30 \mu F$, $f = 6kHz$

سؤال ١٧

نفترض أن الجهد على دائرة توالي RL هو $\dot{V} = 100 \angle 0^\circ (V)$ ويمر تيار $\dot{I} = 5 \angle (-\pi/3)$ خلال هذه الدائرة . أكتب الممانعة \dot{Z} لهذه الدائرة باستخدام الدوال المثلثية والإحداثيات المتعامدة .

سؤال ١٨

دائرة توالي RLC بياناتها هي : $R=3(\Omega)$, $X_L=6(\Omega)$, $X_C=2(\Omega)$ يغذيها جهد متغير جيبي، القيمة الفعالة له هي $100(V)$. احسب ما يلي :

- (١) الممانعة \dot{Z} وقيمة $Z (\Omega)$ لهذه الدائرة .
- (٢) التيار \dot{I} وقيمة $I(A)$ المار في الدائرة .
- (٣) زاوية الممانعة ϕ

سؤال ١٩

دائرة توالي RC بياناتها هي : $R=8(\Omega)$, $X_C=6(\Omega)$ يغذيها جهد متغير جيبي، القيمة الفعالة له هي $12(V)$. احسب ما يلي :

- (١) الممانعة \dot{Z} وقيمة $Z(\Omega)$ لهذه الدائرة .
- (٢) التيار \dot{I} وقيمة $I(A)$ المار في هذه الدائرة .

هـ- دائرة التوازي RLC

يبين الشكل ٤ - ٣١ (أ) توصيل القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة الجيبية $e(V)$ إلى دائرة مكونة من C , L , R متصلة على التوازي . ويمكن حساب قيمة التيار المار في كل فرع من هذه الدائرة كما يلي :

$$\dot{V} = V \epsilon^{j0} \quad (V)$$

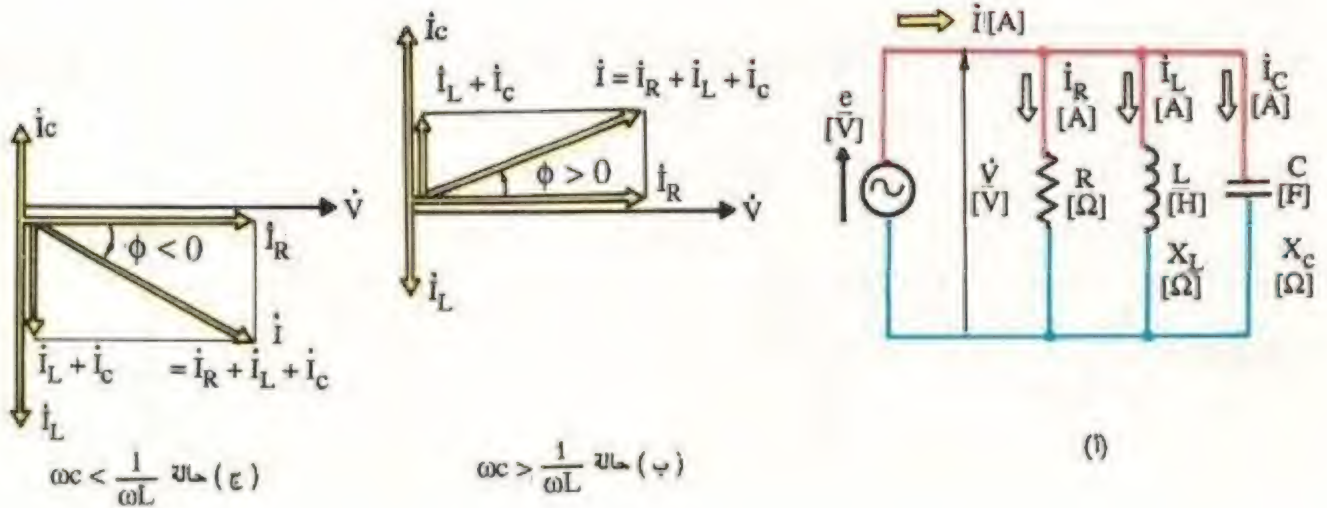
$$\dot{I}_R = I_R \epsilon^{j0} = \frac{V}{R} \quad (A)$$

$$\dot{I}_L = I_L \epsilon^{j(-\pi/2)} = -j \frac{V}{X_L} = -j \frac{V}{\omega L} \quad (A)$$

$$\dot{I}_C = I_C \epsilon^{j(\pi/2)} = j \frac{V}{X_C} = j\omega CV \quad (A)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C = V \left\{ \frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \right\} = I \epsilon^{j\phi} \quad (A)$$

(4-54)



الشكل ٤ - ٣١ الجهد والتيار في دائرة التوازي RLC

ومن هذه المعادلات يمكن كتابة معادلة ممانعة هذه الدائرة كما يلي :

$$\begin{aligned}\dot{Z} &= \frac{\dot{V}}{\dot{I}} = \frac{V \epsilon^{j0}}{I \epsilon^{j\phi}} = Z \epsilon^{j(-\phi)} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})} \\ &= \frac{\frac{1}{R}}{(\frac{1}{R})^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2} - j \frac{\omega C - \frac{1}{\omega L}}{(\frac{1}{R})^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2} (\Omega)\end{aligned} \quad (4-55)$$

وكتابة معادلة القيمة المطلقة Z وزاوية الممانعة ϕ للممانعة \dot{Z} تكون كما يلي :

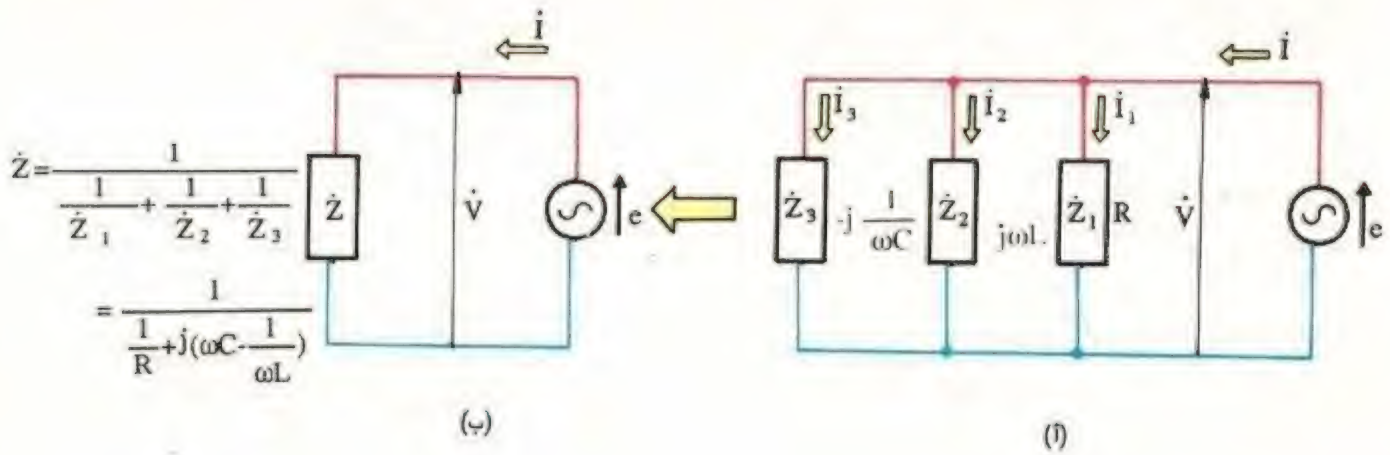
$$\begin{aligned}Z = |\dot{Z}| &= \sqrt{\left| \frac{\frac{1}{R}}{(\frac{1}{R})^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2} \right|^2 + \left| \frac{\omega C - \frac{1}{\omega L}}{(\frac{1}{R})^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2} \right|^2} \\ &= \frac{1}{\sqrt{(\frac{1}{R})^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2}} (\Omega) \\ \tan \phi &= \frac{I_C - I_L}{I_R} = \frac{\omega C - \frac{1}{\omega L}}{\frac{1}{R}}\end{aligned} \quad (4-56)$$

و- طريقة حساب دائرة التوازي باستخدام السماحية (admittance)

يمكن التعبير عن الممانعات \dot{Z}_1 , \dot{Z}_2 , \dot{Z}_3 في أفرع دائرة الشكل ٤ - ٣١ (أ) بالمعادلات الآتية :

$$\dot{Z}_1 = R (\Omega) , \quad \dot{Z}_2 = jX_L = j\omega L (\Omega) , \quad \dot{Z}_3 = -jX_C = -j\frac{1}{\omega C} (\Omega) \quad (4-57)$$

ويبين الشكل ٤ - ٣٢ (أ) والشكل ٤ - ٣٢ (ب) هذه العلاقات .



الشكل ٤ - ٣٢ دائرة التوازي RLC والممانعة

والسماحية هي مقلوب الممانعة، ويرمز لها بالرمز \dot{Y} ووحدة قياسها سيمنس (S) ويمكن كتابة المعادلة (4-57) بدلالة السماحية كما يلي :

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y}_1 &= \frac{1}{\dot{Z}_1} = \frac{1}{R} (S) , \quad \dot{Y}_2 = \frac{1}{\dot{Z}_2} = \frac{1}{j\omega L} = -j\frac{1}{\omega L} (S) \\ \dot{Y}_3 &= \frac{1}{\dot{Z}_3} = \frac{1}{-j\frac{1}{\omega C}} = j\omega C (S) \end{aligned} \right\} (4-58)$$

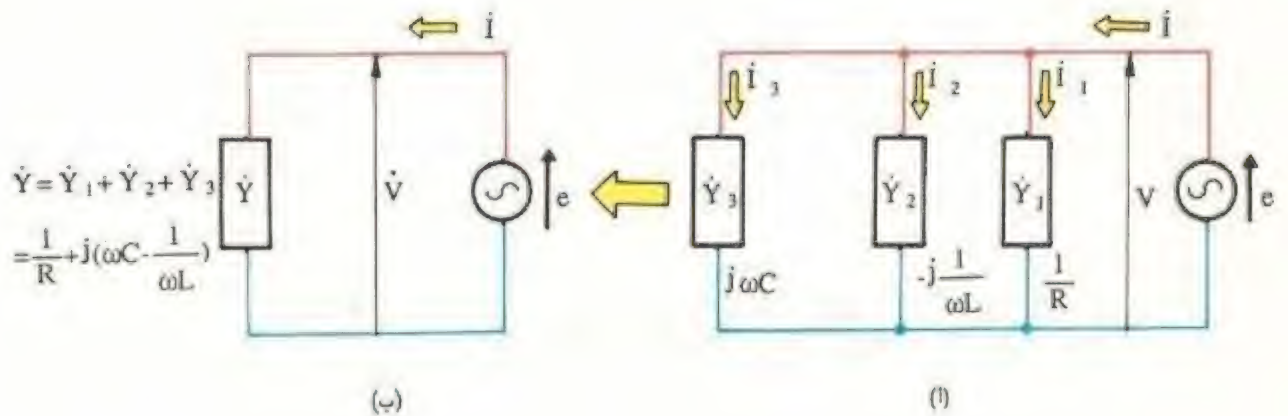
ويمكن كتابة معادلة التيارات كما يلي :

$$\dot{I}_1 = \dot{Y}_1 \dot{V} \text{ (A)}, \quad \dot{I}_2 = \dot{Y}_2 \dot{V} \text{ (A)}, \quad \dot{I}_3 = \dot{Y}_3 \dot{V} \text{ (A)}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = (\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3) \dot{V} \text{ (A)} \quad (4-59)$$

من المعادلات السابقة تحسب السماحية الكلية \dot{Y} لدائرة التوازي كمجموع سماحيات أفرع الدائرة :

$$\dot{Y} = \frac{\dot{I}}{\dot{V}} = \frac{1}{\dot{Z}} = \dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3 = \frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \text{ (S)} \quad (4-60)$$



الشكل ٤ - ٣٣ دائرة التوازي RLC والسماحية .

ويبين الشكلان ٤ - ٣٣ (أ) و ٤ - ٣٣ (ب) هذه العلاقات .

ويمكن كتابة السماحية (مقلوب الممانعة) في صورة العدد المركب

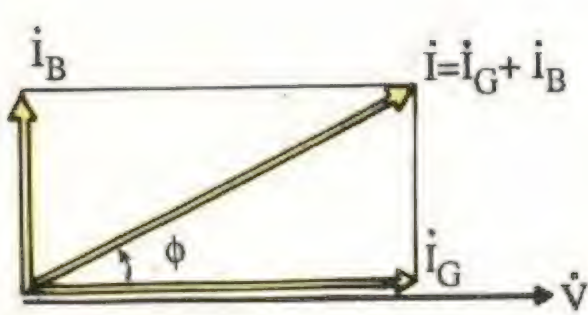
$$\dot{Y} = G + jB \quad (S) \quad (4-61)$$

ومن المعادلة السابقة نجد أن (G) هي التوصيلية و (B) هي التعرضية ، ووحدة قياس كل منهما سيمنس (S) .

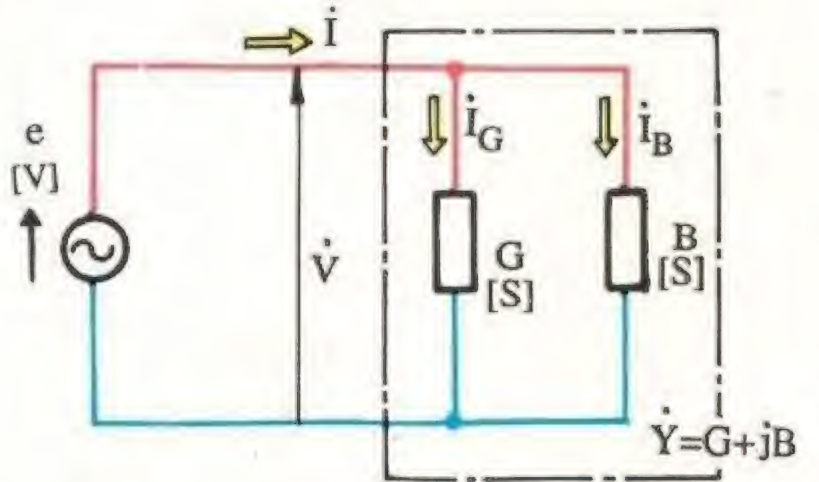
تبين المعادلة الآتية القيمة المطلقة \dot{Y} للسماحية Y وفرق الطور ϕ بين الجهد والتيار ويبين الشكل ٤ - ٣٤ شكل المتجهات والدائرة المكافئة .

$$Y = |\dot{Y}| = \sqrt{G^2 + B^2} \quad (S) , \quad \tan \phi = B / G \quad (4-62)$$

ويمكن تسهيل حسابات دائرة التوازي باستخدام السماحية .



(ب) شكل المتجهات



(أ) الدائرة المكافئة

الشكل ٤ - ٣٤ السماحية والدائرة المكافئة

مثال ٢

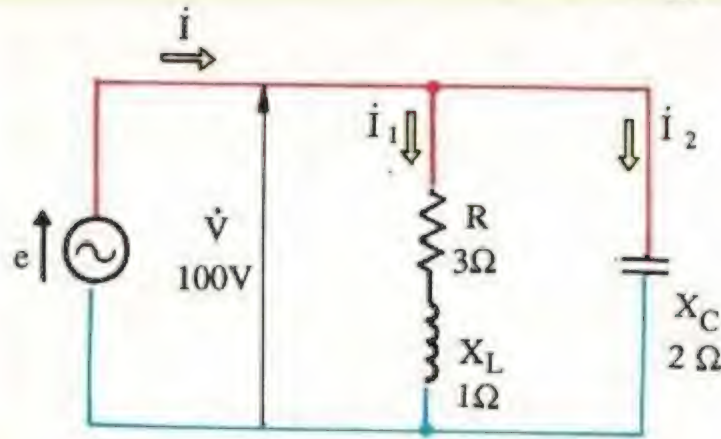
احسب المتغيرات التالية للدائرة المبينة في الشكل ٤ - ٣٥ وارسم شكل المتجهات بالقياس إلى الجهد .

(١) السماحية الكلية $\dot{Y}(S)$ للدائرة .

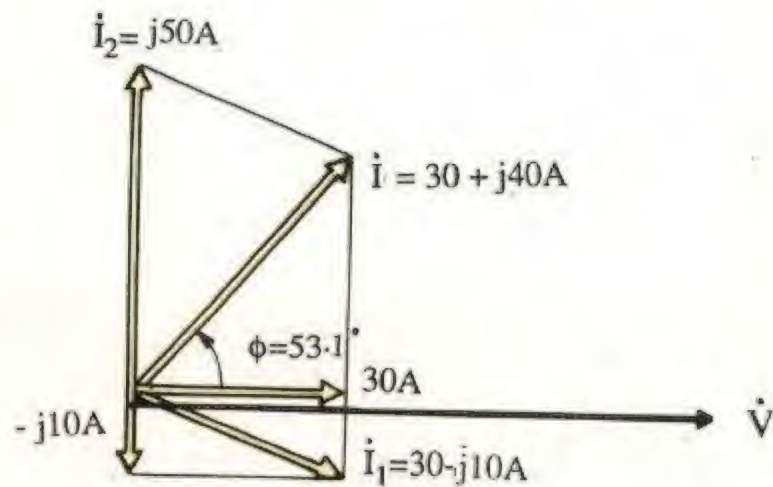
(٢) الممانعة الكلية $\dot{Z}(\Omega)$ للدائرة

(٣) التيارات $\dot{I}(A)$, $\dot{I}_1(A)$, $\dot{I}_2(A)$

(٤) فرق الطور ϕ بين \dot{V} , \dot{I} .



الشكل ٤ - ٣٥ .



الشكل ٤ - ٣٦ رسم المتجهات بالقياس إلى الجهد

الحل

$$(1) \dot{Y}_1 = \frac{1}{3+j1} = 0.3 - j 0.1 \text{ S} \quad \dot{Y}_2 = \frac{1}{-j2} = j 0.5 \text{ S}$$

$$\dot{Y} = \dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 = 0.3 - j 0.1 + j 0.5 = 0.3 + j 0.4 \text{ S}$$

$$(2) \dot{Z} = \frac{1}{\dot{Y}} = \frac{1}{0.3 + j 0.4} = 1.2 - j 1.6 \text{ } \Omega$$

$$(3) \dot{I}_1 = \dot{Y}_1 \dot{V} = (0.3 - j 0.1) \times 100 = 30 - j 10 \text{ A}$$

$$\dot{I}_2 = \dot{Y}_2 \dot{V} = j 0.5 \times 100 = j 50 \text{ A}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 30 - j 10 + j 50 = 30 + j 40 \text{ A}$$

$$(4) \tan \Phi = \frac{B}{G} = \frac{0.4}{0.3} = 1.33 \quad \Phi = 53.1^\circ$$

سؤال ٢٠

لنفترض أن دائرة التوازي في الشكل ٤ - ٣١ لها المعاملات الآتية :

$$\dot{V} = 120 \text{ (V)} , \quad R = 30 \text{ (}\Omega\text{)} , \quad X_L = 20 \text{ (}\Omega\text{)} , \quad X_C = 40 \text{ (}\Omega\text{)}$$

أجب عن الأسئلة الآتية مع مراعاة حل الأسئلة (١) ، (٢) ، (٣) باستخدام

الإحداثيات المتعامدة والدوال المثلثية :

(١) السماحية الكلية \dot{Y} للدائرة .

(٢) الممانعة الكلية \dot{Z} للدائرة .

(٣) التيار \dot{I} المار في الدائرة .

(٤) رسم المتجهات بالقياس إلى الجهد .

ي - رنين التوالي Series resonance

يمكن كتابة ممانعة دائرة توالى RLC فى الشكل ٤ - ٣٧ فى الصورة التى تم استنتاجها فى المعادلة (4 - 53) .

وفى هذه المعادلة يصبح الجزء التخيلى مساوياً للصفر أى ($Z = R$) عندما يكون ($\omega L = 1 / \omega C$) وتكون القيمة المطلقة للممانعة أقل مايمكن ، ويكون التيار المار فى الدائرة أكبر مايمكن . تسمى هذه الحالة رنين التوالي . والتردد الذى يحدث عنده الرنين يسمى تردد الرنين ، ويرمز له بالرمز f_0 والتردد الدائرى عند الرنين هو ω_0 حيث :

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} , \quad 2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C}$$

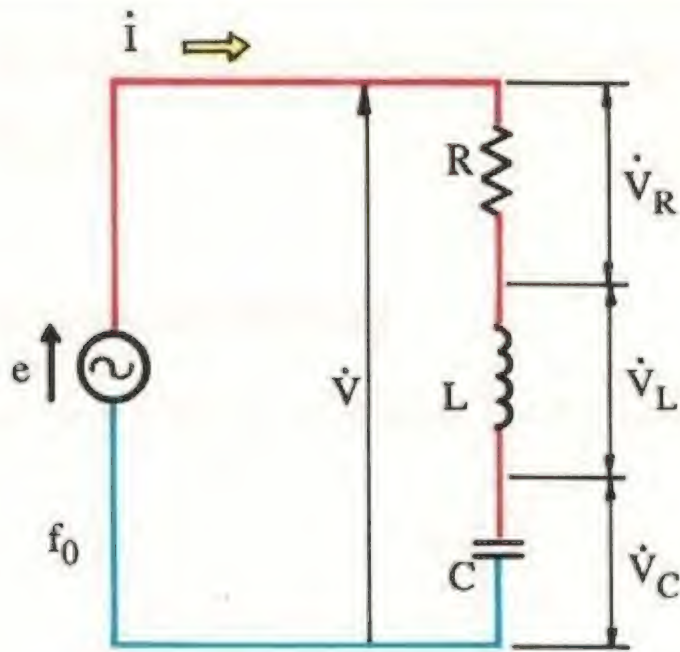
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (\text{Hz}) \quad (4 - 63)$$

ويحدد تردد رنين الدائرة بقيمة الملف وقيمة المكثف دون النظر إلى قيمة المقاومة، وعند الرنين يكون فرق الجهد بين أطراف الملف والمكثف كما يلي :

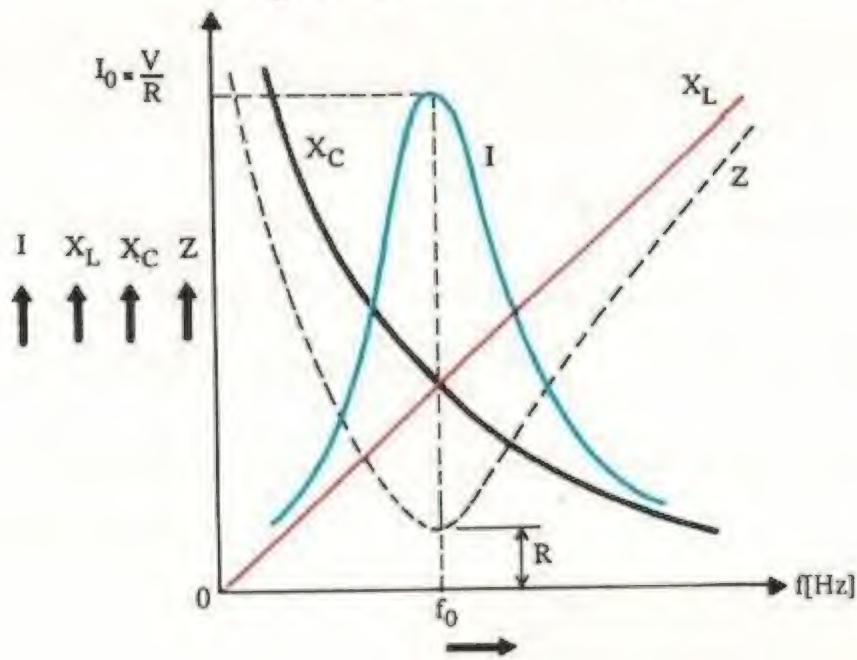
$$V_L = V_C = \frac{V}{R} \omega_0 L = \frac{V}{R} \cdot \frac{1}{\omega_0 C}$$

$$\frac{V_L}{V} = \frac{V_C}{V} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R \omega_0 C} = Q \quad (4 - 64)$$

قيمة Q فى المعادلة السابقة هى النسبة بين V_L ، V أو بين V_C ، V عند الرنين وتسمى معامل جودة الدائرة، وتعبّر عن حدة الرنين .



الشكل ٣٧ - ٤ دائرة توالي RLC



الشكل ٣٨ - ٤ الخواص الترددية لدائرة رنين التوالي .

أي إن فرق الجهد على الملف يساوي قيمة Q مضروبة في جهد مصدر القدرة V وأيضاً فرق الجهد على المكثف يساوي قيمة Q مضروبة في جهد مصدر القدرة V عند تردد الرنين .

يبين الشكل ٤ - ٣٨ الخواص الترددية لدائرة رنين التوالي . وكلما زادت قيمة Q أصبح منحنى التيار أكثر حدة .

ط - رنين التوازي Parallel resonance

تعطي المعادلات الآتية التيار \dot{I} المار في دائرة توازي LC في الشكل ٤ - ٣٩ :

$$\dot{Y}_1 = \frac{1}{j\omega L} , \quad \dot{Y}_2 = j\omega C$$

$$\dot{I}_1 = \dot{Y}_1 \dot{V} = \frac{1}{j\omega L} \dot{V} , \quad \dot{I}_2 = \dot{Y}_2 \dot{V} = j\omega C \dot{V}$$

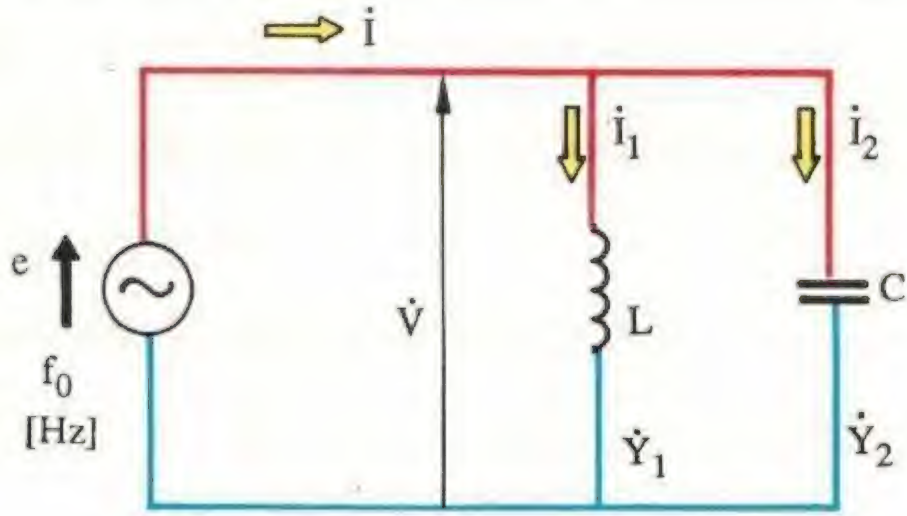
$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{Y}_1 \dot{V} + \dot{Y}_2 \dot{V} = \dot{Y} \dot{V} = j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \dot{V} \quad (4-65)$$

وتبين المعادلة السابقة أنه عندما يكون $\left(\omega C = \frac{1}{\omega L}\right)$ فإن السماحية تساوى صفراً ($\dot{Y}=0$) والممانعة تساوى ما لانهاية ($\dot{Z}=\infty$) والتيار يساوى صفراً ($\dot{I}=0$) ويسمى ذلك رنين التوازي . في الدائرة الحقيقية لا تتحقق المعادلتان $\dot{I}=0$ و $\dot{Z}=\infty$ لأن الملف له مقاومة.

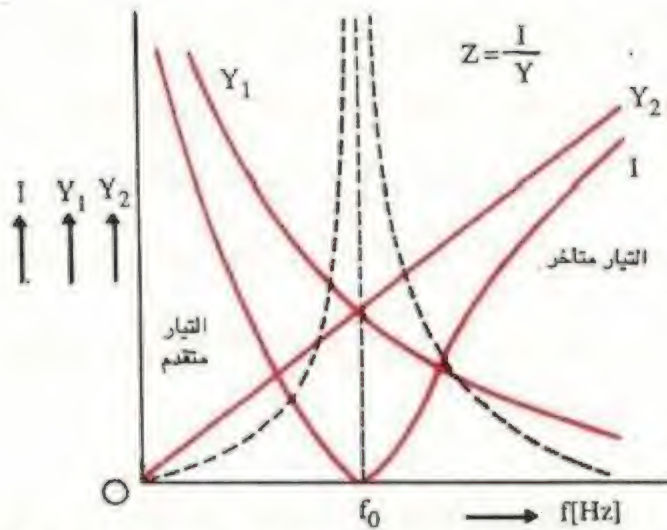
يسمى التردد الذي يحدث عنده رنين التوازي أيضاً تردد الرنين، ويرمز له بالرمز f_0 وقيمته كما في المعادلة الآتية :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ (Hz)} \quad (4-66)$$

يبين الشكل ٤ - ٤٠ الخواص الترددية لدائرة رنين توازي LC .



الشكل ٤ - ٣٩ دائرة توازي LC



الشكل ٤ - ٤٠ الخواص الترددية لدائرة رنين توازي LC .

سؤال ٢١

نفترض أن حالة الرنين حدثت عند توصيل الجهد المتغير $V = 10$ (V) إلى دائرة توالى مكونة من $C = 25$ (μF) , $L = 40$ (mH) , $R = 1$ (Ω)
احسب تردد الرنين f_0 ومعامل جودة الدائرة Q و التيار I و الجهود V_C , V_L على الملف والمكثف .

سؤال ٢٢

المعادلة (4 - 66) تعطى قيمة تردد الرنين f_0 لدائرة التوازي بشرط $\frac{1}{LC} \gg (R/L)^2$ حيث R هي مقاومة الملف .

احسب ترددات رنين التوالي، ورنين التوازي إذا كانت

$$C = 25 (\mu F), L = 40 (m H), R = 1 (\Omega)$$

٤ - ٤ القدرة في دائرة التيار المتغير

في دائرة التيار المتغير يمكن التعبير عن الجهد والتيار بدلالة القيم الفعالة . وفي دائرة التيار المستمر يعطينا حاصل ضرب الجهد في التيار القدرة المستهلكة . بينما في دائرة التيار المتغير يسمى حاصل ضرب القيم الفعالة للجهد والتيار (القدرة الظاهرة) لأنها ليست القدرة المستهلكة في الحمل التي تقل عن القدرة الظاهرة لوجود فرق طور بين الجهد والتيار . في هذا الجزء سنقوم بدراسة القدرة في دائرة التيار المتغير الجيبي .

٤ - ٤ - ١ القدرة ومعامل القدرة Power factor في دائرة التيار المتغير

أ - التعبير عن القدرة

يبين الشكل ٤ - ١ (أ) جهد متغير جيبي يقوم بتغذية حمل مكون من دائرة توالي RL . والعلاقات بين التيار i والجهد v على الحمل هي (كما في الفصل الثالث) :

$$v = \sqrt{2} V \sin \omega t \text{ (V)}, \quad i = \sqrt{2} I \sin (\omega t - \phi) \text{ (A)} \quad (4 - 67)$$

$$I = \frac{V}{Z}, \quad Z = | \dot{Z} | = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad \tan \phi = \frac{X_L}{R}$$

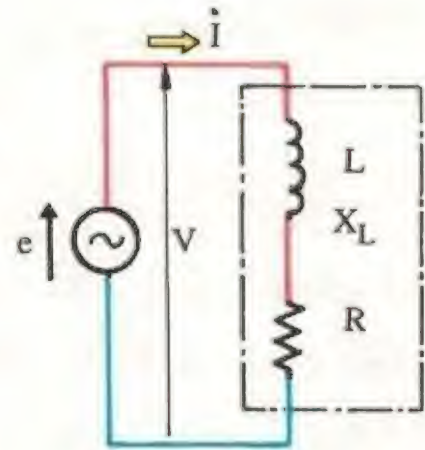
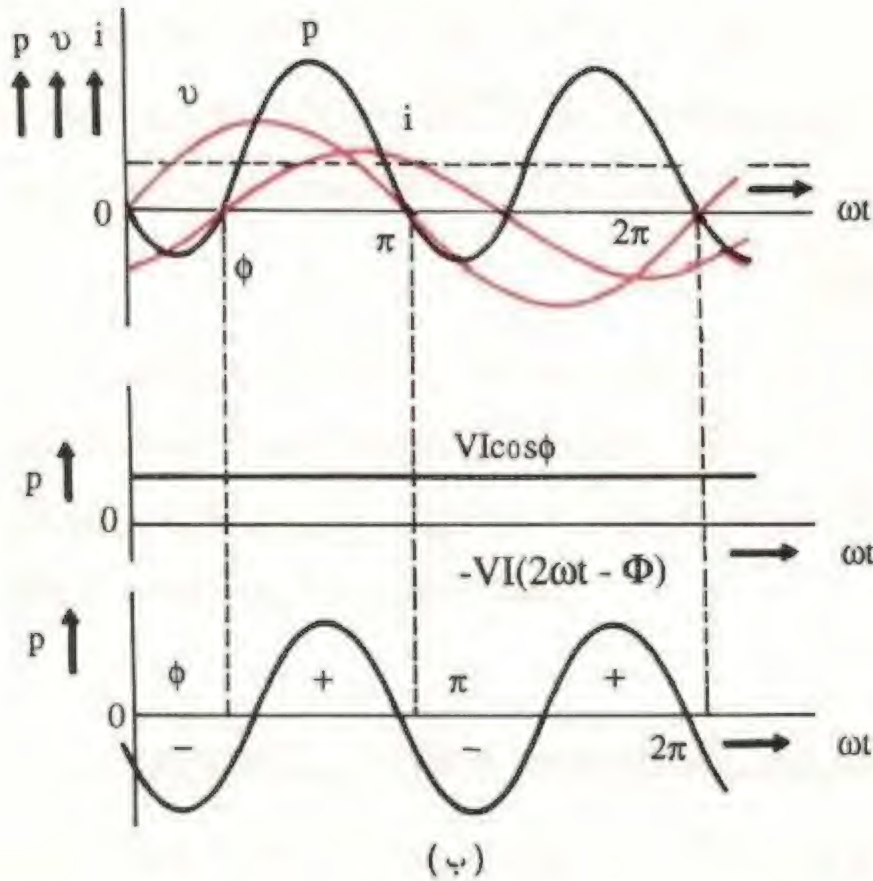
القدرة اللحظية هي حاصل ضرب الجهد $v(V)$ في التيار $i(A)$ كما يلي :

$$P = vi = \sqrt{2} V \sin \omega t \cdot \sqrt{2} I \sin (\omega t - \phi)$$

$$= 2 V I \sin \omega t \cdot \sin (\omega t - \phi) = V I \cos \phi - V I \cos (2 \omega t - \phi) \quad (W) \quad (4-68)$$

يحسب ذلك باستخدام التعويض $\alpha = \omega t$, $\beta = \omega t - \phi$ واستخدام معادلة الدوال المثلثية

$$2 \sin \alpha \sin \beta = \cos (\alpha - \beta) - \cos (\alpha + \beta)$$



الشكل ٤ - ٤١ القدرة في دائرة التيار المتغير

يبين الشكل ٤ - ٤١ (ب) الأشكال الموجية للجهد V والتيار i والقدرة اللحظية P . الحد الأول في الطرف الأيمن للمعادلة (4 - 68) هو كمية ثابتة لا تعتمد على الزمن t وموضحة في الشكل ٤ - ٤١ (ب) . الحد الثاني في الطرف الأيمن للمعادلة (4 - 68) هو موجة جيبية أقصى قيمة لها (VI) وترددها يساوي ضعف تردد مصدر القدرة . والشكل الموجي لهذا الحد موضح أيضاً في الشكل ٤ - ٤١ (ب) وقيمته المتوسطة خلال دوره كاملة تساوي صفراً . حيث القدرة اللحظية هي مجموع هذين الحدين .

والقدرة في الجزء السالب من P تبين أن القدرة المخزونة كطاقة كهرومغناطيسية في الملف تعود إلى مصدر القدرة خلال الجزء السالب من الدورة .

لهذا فإن القيمة المتوسطة $P(W)$ للقدرة خلال دورة واحدة من القدرة اللحظية $P(W)$ ، هي الحد الأول من المعادلة (4 - 68) كما في العلاقة التالية :

$$P = VI \cos \phi \quad (W) \quad (4 - 69)$$

تم استنتاج هذه العلاقة في حالة حمل مكون من دائرة توالي RL . ويمكن استنتاج هذه العلاقة نفسها لأحمال مكونة من دائرة توالي RC أو دائرة توالي RLC مع حساب التقديم والتأخير في التيار . وتسمى القيمة المتوسطة للقدرة القدرة النشطة أو القدرة الفعالة أو القدرة المستهلكة في دائرة التيار المتغير .

ب - القدرة الظاهرة $Apparent power$ ومعامل القدرة

في المعادلة (4 - 69) القدرة الظاهرة هي VI ويرمز لها بالرمز S ووحدتها قياسها هي (فولت أمبير) ورمزها VA . والنسبة بين القدرة الفعالة P والقدرة الظاهرة S تسمى معامل القدرة ومعادلتها كمايلي :

$$\cos \phi = \frac{VI \cos \phi}{VI} = \frac{P}{S} \quad (4 - 70)$$

عند استخدام حمل مكون من مقاومة فقط، فإن فرق الطور بين الجهد والتيار يساوى صفرًا $\phi = 0$ (rad) ويكون $\cos \phi = 1$. وعند استخدام حمل مكون من ملف L فقط أو مكثف C فقط، فإن فرق الطور بين الجهد والتيار يساوى $\frac{\pi}{2}$ (rad) ويكون $\cos \phi = 0$. وهذا يعني أن معامل القدرة تتراوح قيمته بين الصفر والواحد الصحيح. وعند التعبير عن هذه القيمة كنسبة مئوية تكون قيمتها بين صفر و100%. وفي حالة الدائرة الحثية يكون معامل القدرة متأخرًا أما في حالة الدائرة السعوية (الشبيهة بالمكثف) فيكون معامل القدرة متقدمًا.

ومن المعادلة (4 - 67) يمكن كتابة فرق الوجه بين الجهد والتيار بالعلاقة :

$$\tan \phi = \frac{X_L}{R}$$

وقيمة الممانعة Z هي $\sqrt{R^2 + X_L^2}$ وباستخدام هذه العلاقات يمكن استنتاج معامل القدرة في الصورة الآتية :

$$\cos \phi = \frac{R}{Z}$$

(4 - 71)

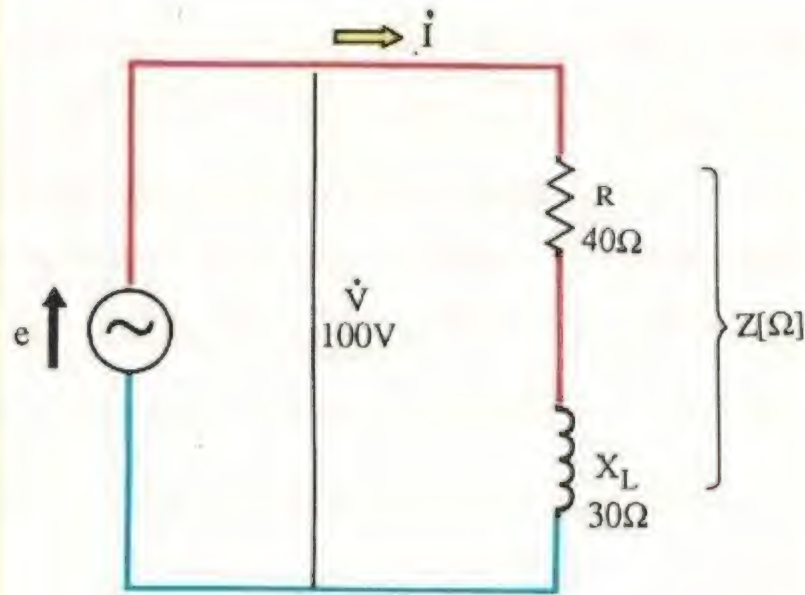
ويمكن استنتاج هذه المعادلة باستخدام الممانعة :

$$\dot{Z} = R + j X_L = Z (\cos \phi + j \sin \phi)$$

وتكون زاوية الممانعة ϕ هي زاوية معامل القدرة .

مثال ٣

في الشكل ٤ - ٤٢ يقوم جهد متغير قيمته 100(V) بتغذية حمل مكون من دائرة توالى $R = 40 (\Omega)$, $X_L = 30 (\Omega)$. احسب معامل القدرة للحمل؛ واحسب القدرة الفعالة .



الشكل ٤ - ٤٢ دائرة توالي RL

الحل

الممانعة Z في هذه الدائرة هي : $Z = \sqrt{(40)^2 + (30)^2} = 50 \Omega$

معامل القدرة هو : $\cos \phi = \frac{R}{Z} = \frac{40}{50} = 0.8 = 80 \%$

التيار I هو : $I = \frac{V}{Z} = \frac{100}{50} = 2 \text{ A}$

القدرة الفعالة هي : $P = V I \cos \phi = 100 \times 2 \times 0.8 = 160 \text{ W}$

سؤال ٢٣

يقوم جهد متغير قيمته 100(V) بتغذية دائرة، فيمر فيها تيار قيمته 8(A)، وكان معامل القدرة للحمل هو 80%. احسب القدرة الفعالة P والقدرة الظاهرة S .

سؤال ٢٤

يقوم جهد متغير قيمته $100(V)$ بتغذية دائرة ، فيمر فيها تيار قيمته $5(A)$ والقدرة المستهلكة في الحمل هي $400(V)$. احسب معامل القدرة $\cos \phi$ والممانعة Z ، والمقاومة R ، ومفاعلة الحمل X_L .

٤ - ٤ - ٢ العلاقة بين القدرة الظاهرة والقدرة الفعالة Active power

وغير الفعالة في دائرة توالى RL

في الشكل ٤ - ٤١ (أ) يمكن كتابة التيار i بدلالة الأعداد المركبة كمايلي :

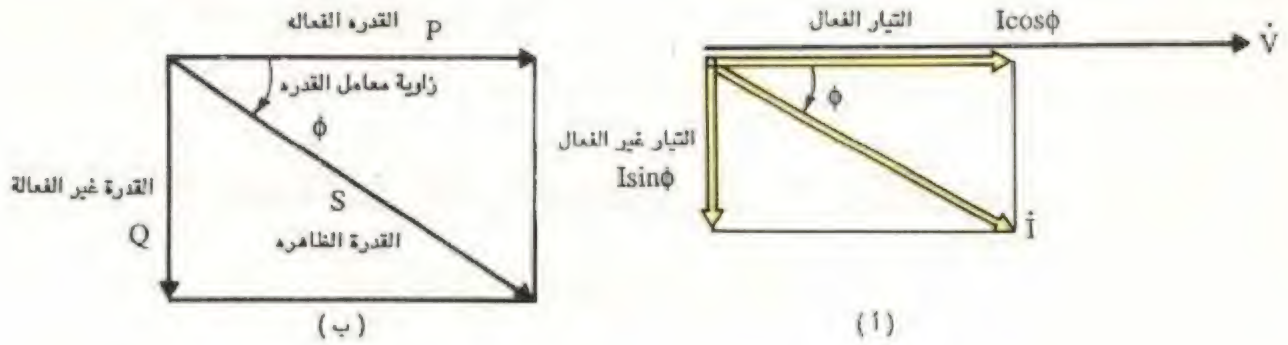
$$i = I e^{j(-\phi)} = I (\cos \phi - j \sin \phi) \quad (A) \quad (4-72)$$

ويبين الشكل ٤ - ٤٣ (أ) رسم المتجهات للعلاقة السابقة بالقياس إلى الجهد. والتيار $(I \cos \phi)$ ، الذي له الوجه نفسه مثل الجهد V في رسم المتجهات، هو الجزء الفعال من التيار . أما التيار $(I \sin \phi)$ والذي يتأخر بزاوية $\pi / 2(\text{rad})$ عن الجهد فهو الجزء غير الفعال من التيار وحاصل ضرب الجهد V في الجزء الفعال $(I \sin \phi)$ من التيار يعطي القدرة الفعالة . أما حاصل ضرب الجهد V في الجزء غير الفعال $(I \sin \phi)$ من التيار فيعطي القدرة غير الفعالة ، التي يرمز لها بالرمز Q ووحدة قياسها فولت أمبير غير فعال، ويرمز لها بالرمز var .

$$\left. \begin{aligned} P &= V I \cos \phi = I^2 R \quad (W) \quad \text{القدرة الفعالة} \\ Q &= V I \sin \phi = I^2 X_L \quad (\text{var}) \quad \text{القدرة غير الفعالة} \end{aligned} \right\} \quad (4-73)$$

ويلاحظ أن معامل القدرة $(\cos \phi)$ هو النسبة بين القدرة الفعالة P والقدرة الظاهرة S أما معامل القدرة غير الفعالة $(\sin \phi)$ فهو النسبة بين القدرة غير الفعالة Q والقدرة الظاهرة S .

ويمكن استنتاج المعادلة الآتية من المعادلة السابقة (4 - 73) :



الشكل ٤ - ٤٣ متجهات التيار والجهد والقدرة في دائرة توالي RL .

$$P^2 + Q^2 = (V I \cos \phi)^2 + (V I \sin \phi)^2$$

$$= V^2 I^2 (\cos^2 \phi + \sin^2 \phi) = V^2 I^2 = S^2$$

أي إن القدرة الظاهرة تحقق العلاقة :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (VA)$$

(4 - 74)

القدرة الظاهرة = $\sqrt{(القدرة \text{ الفعالة})^2 + (القدرة \text{ غير الفعالة})^2}$

وطبقا للمعادلة (4 - 74) فإن الشكل ٤-٤٣ (ب) يبين رسم متجهات القدرة . ويشبه ذلك رسم المتجهات في الشكل ٤ - ٤٣ (أ) .

سؤال ٢٥

يقوم جهد متغير قيمته (V) 100 بتغذية دائرة توالى مكونة من مقاومة $R = 6(\Omega)$ ومفاعلة حثية $X_L = 8(\Omega)$. احسب التيار I المار في الحمل ومعامل القدرة $(\cos \phi)$ والقدرة الفعالة P والقدرة غير الفعالة Q والقدرة الظاهرة S.

٤ - ٥ التيار المتغير ثلاثى الأوجه Three phase AC

يستخدم التيار المتغير ثلاثى الأوجه في المصانع والمؤسسات التى تستهلك كميات كبيرة من القدرة الكهربائية، وذلك لإمكانية نقل القدرة العالية بصورة اقتصادية وتغذية محرك الحث باستخدام التيار المتغير ثلاثى الأوجه كمصدر قدرة . وفى هذا الفصل نقوم بدراسة الخواص الرئيسية للتيار المتغير ثلاثى الأوجه وحساب الدوائر وتحليل المجال المغناطيسي لهذا النوع من التيار .

٤ - ٥ - ١ التيار المتغير ثلاثى الأوجه

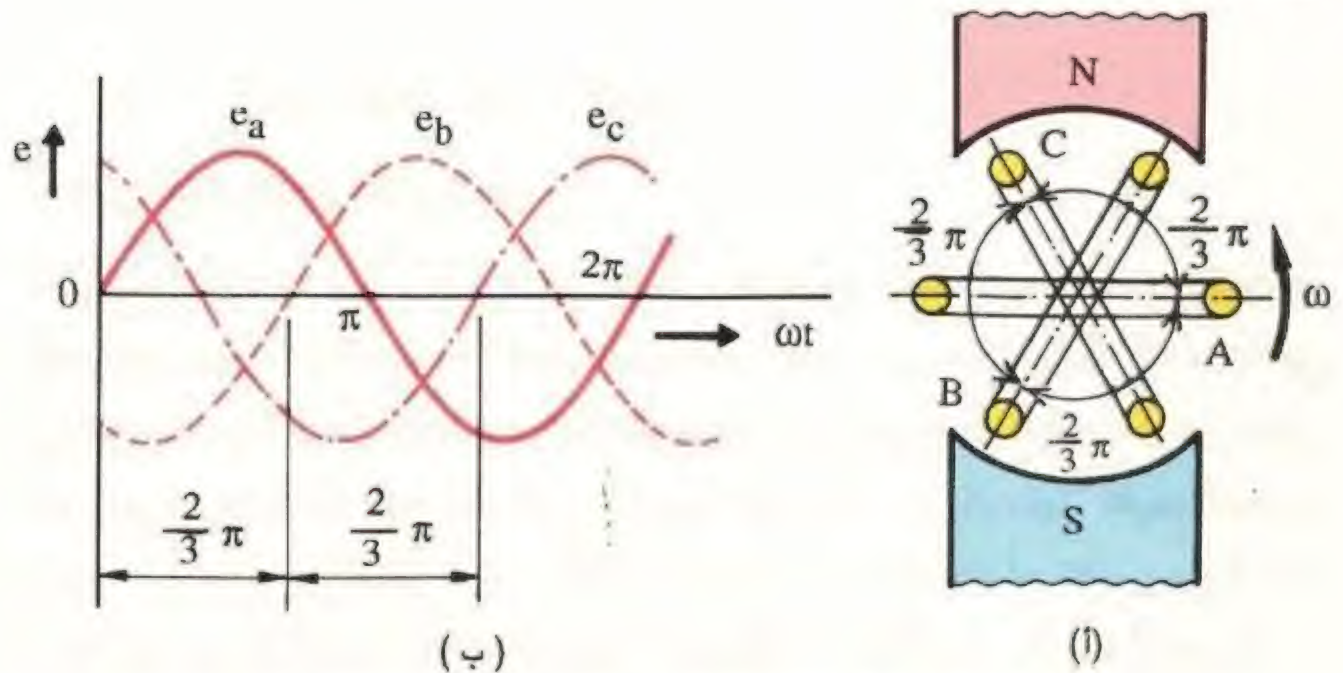
أ- توليد التيار المتغير ثلاثى الأوجه

عند وضع ثلاثة ملفات A , B , C في مجال مغناطيسى منتظم بحيث تكون الزاوية بين كل ملف والذى يليه $2\pi/3$ (rad) وإذا قمنا بإدارة هذه الملفات بسرعة دائرية ω (rad/s) في عكس اتجاه عقارب الساعة تتولد قوة دافعة كهربائية متغيرة جيبية في الملفات ، ويكون الفرق في الطور بين كل قوة دافعة كهربائية والذى تليها هو $2\pi/3$ (rad) ، ويكون لها القيمة القصوى نفسها . ونحصل على التيار المتغير ثلاثى الأوجه باستخدام حلقات تلامس مع الدائرة الخارجية بعد توصيل القوى الدافعة الكهربائية على شكل Y (التفاصيل ستأتي فيما بعد) .

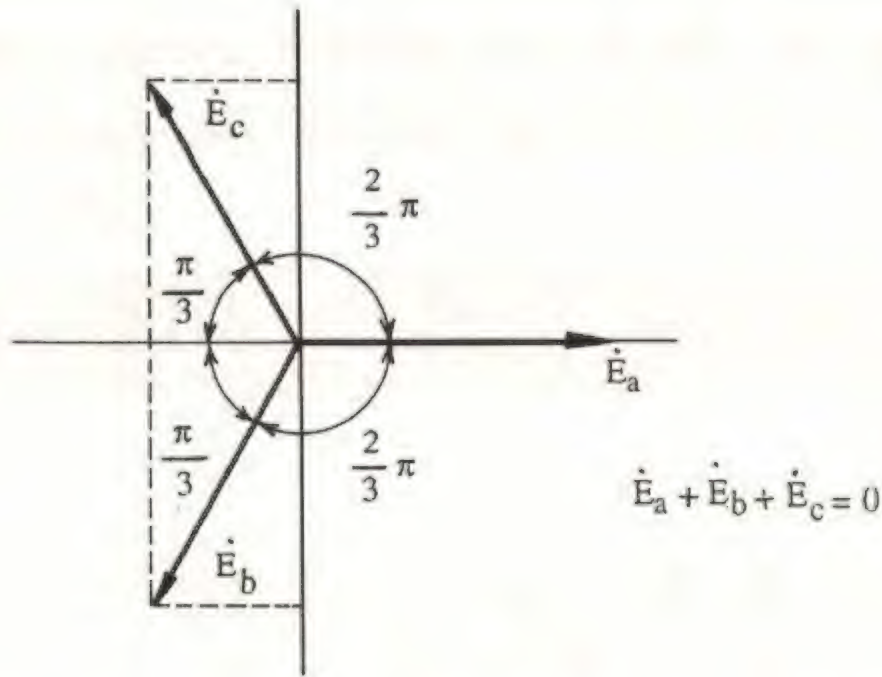
وتتولد القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة ثلاثية الأوجه باستخدام مولد متزامن ثلاثي الأوجه .
نفترض أن القيمة الفعالة للقوة الدافعة الكهربائية في كل ملف هي $E(V)$ وأن السرعة
الدائرية هي ω (rad/s) وأن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة في الملف A هي أساس
القياس، فيمكن كتابة القوى الدافعة الكهربائية e_a , e_b , e_c (V) في الملفات الثلاثة
بالمعادلات الآتية والأشكال الموجية كما في الشكل ٤ - ٤٤ (ب) .

$$\left. \begin{aligned} e_a &= \sqrt{2} E \sin \omega t \quad (V) \\ e_b &= \sqrt{2} E \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (V) \\ e_c &= \sqrt{2} E \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (V) \end{aligned} \right\} (4-75)$$

وفي المعادلة (4 - 75) نجد أن تسلسل القيمة القصوى للقوى الدافعة الكهربائية في
الملفات تعطي الترتيب e_a ثم e_b ثم e_c . وهذا الترتيب يسمى تسلسل زاوية الوجه أو
دوران الزاوية.



الشكل ٤ - ٤٤ توليد التيار المتغير ثلاثي الأوجه المتماثل .



الشكل ٤ - ٤٥ رسم المتجهات للتيار المتغير ثلاثي الأوجه المتماثل .

بافتراض أن القوى الدافعة الكهربائية ثلاثية الأوجه المتماثلة في كل ملف على الترتيب هي \dot{E}_a ثم \dot{E}_b ثم \dot{E}_c وافترض أن زاوية الطور الابتدائية للقوة الدافعة \dot{E}_a (V) هي $0(\text{rad})$ نحصل على المعادلة (4-76) . ويبين الشكل (٤ - ٤٥) رسم المتجهات لهذه المعادلات .

$$\dot{E}_a = E e^{j0} = E$$

$$\dot{E}_b = E e^{j(-2\pi/3)} = E \left\{ \cos\left(\frac{-2\pi}{3}\right) + j \sin\left(\frac{-2\pi}{3}\right) \right\} = E \left(\frac{-1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \quad (4-76)$$

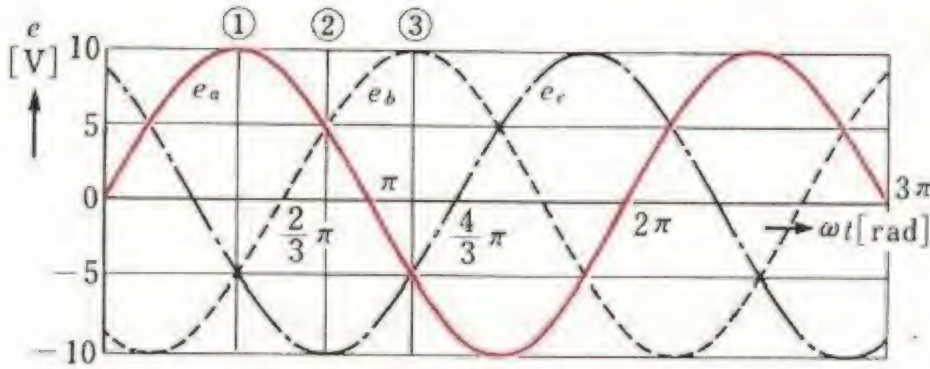
$$\dot{E}_c = E e^{j(-4\pi/3)} = E \left\{ \cos\left(\frac{-4\pi}{3}\right) + j \sin\left(\frac{-4\pi}{3}\right) \right\} = E \left(\frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

ب - جمع القيم اللحظية Instantaneous values للتيار المتغير ثلاثي الأوجه

يبين الشكل ٤ - ٤٦ أن مجموع القيم اللحظية للقوى الدافعة الكهربائية المتغيرة ثلاثية الأوجه e_a , e_b , e_c عند أية لحظة يساوي صفراً، وهذا يتفق مع رسم المتجهات في الشكل

٤٥ - ٤ الذى يوضح أن مجموع القوى الدافعة الكهربائية $\dot{E}_c, \dot{E}_b, \dot{E}_a$ يساوى صفراً .
ويمكن تأكيد حقيقة أن مجموع الجهود المتغيرة ثلاثية الأوجه المتماثلة يساوى صفراً بالاستعانة بالمعادلة (4 - 76) كمايلي :

$$\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = E + E \left(\frac{-1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) + E \left(\frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 0 \quad (4-77)$$



- ① $e_a + e_b + e_c = 10 + (-5) + (-5) = 0$
 ② $e_a + e_b + e_c = 5 + 5 + (-10) = 0$
 ③ $e_a + e_b + e_c = (-5) + 10 + (-5) = 0$

مجموع القيم اللحظية للجهود المتغير ثلاثي الأوجه = صفراً

الشكل ٤ - ٦ القيمة اللحظية للجهود المتغير ثلاثي الأوجه .

مثال ٤

احسب مجموع الجهود e_c, e_b, e_a طبقاً للمعادلة (4 - 75) واستخدام العلاقة

$$\sin (\alpha - \beta) = \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta$$

الحل

$$e_a + e_b + e_c = \sqrt{2} E \left\{ \sin \omega t + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right\}$$

$$= \sqrt{2} E \left\{ \sin \omega t + \left(\sin \omega t \cos \frac{2\pi}{3} - \cos \omega t \sin \frac{2\pi}{3} \right) \right.$$

$$\left. + \left(\sin \omega t \cos \frac{4\pi}{3} - \cos \omega t \sin \frac{4\pi}{3} \right) \right\}$$

$$e_a + e_b + e_c = \sqrt{2} E \left\{ \sin \omega t + \left(-\frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \right) + \left(-\frac{1}{2} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \right) \right\}$$

$$= \sqrt{2} E (\sin \omega t - \sin \omega t) = 0$$

من مثال ٤ يتبين أن مجموع القيم اللحظية للقوى الدافعة الكهربائية المتغيرة ثلاثية الأوجه عند أية لحظة يساوي صفراً . وبالمثل مجموع القيم اللحظية للتيارات المتغيرة ثلاثية الأوجه عند أية لحظة يساوي صفراً .

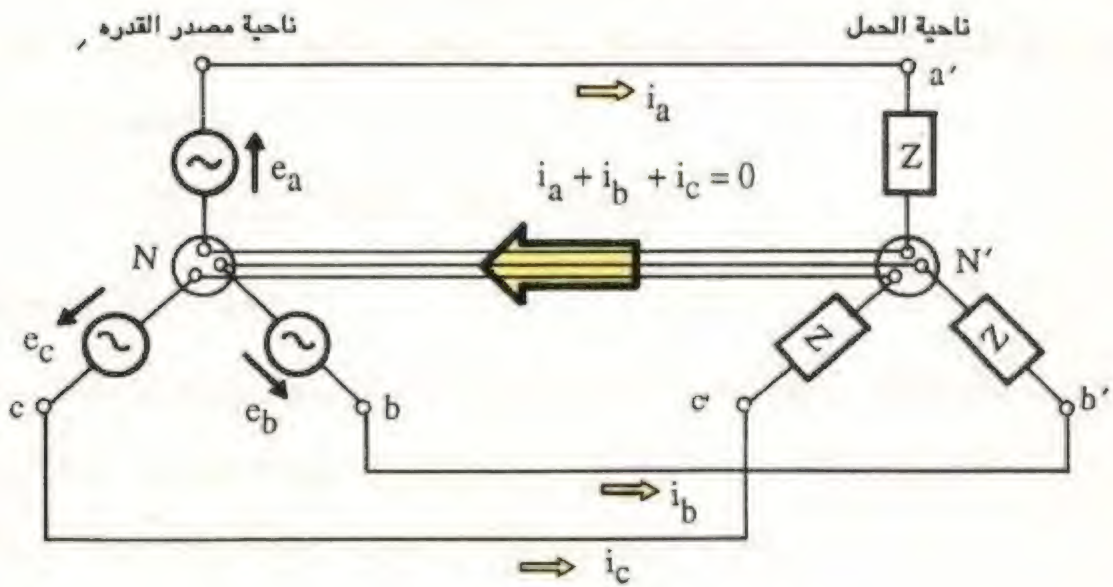
٤ - ٥ - ٢ دائرة التيار المتغير ثلاثي الأوجه

أ- التوصيل ثلاثي الأوجه

تقوم دائرة التيار المتغير ثلاثي الأوجه بتغذية الجهد المتغير ثلاثي الأوجه المتولد من مصدر القدرة إلى الحمل . وسوف نقوم بتحليل طريقة توصيل مصدر القدرة إلى الحمل باستخدام دائرة التيار المتغير ثلاثي الأوجه . ونبين العلاقة بين الجهد والتيار .

ويبين الشكل ٤ - ٧ طريقة توصيل مصدر القدرة بالحمل باستخدام توصيل Y أو توصيل النجمة . وقيم القوى الدافعة الكهربائية للأوجه الثلاثة متساوية، والفرق في الوجه بين كل قوة دافعة كهربائية والتي تليها يساوي $2\pi/3$ (rad) . فإذا كانت ممانعة كل وجه في الحمل تساوي ممانعة الوجه الآخر فإن قيمة التيار المار في كل وجه من الحمل يساوي قيمة التيار المار في الأوجه الأخرى، وفرق الطور بين التيار المار في أحد أوجه الحمل والوجه الذي يليه يساوي $2\pi/3$ (rad) . والحمل الذي له الممانعة نفسها في كل من الأوجه الثلاثة يسمى حملاً متوازناً ثلاثي الأوجه .

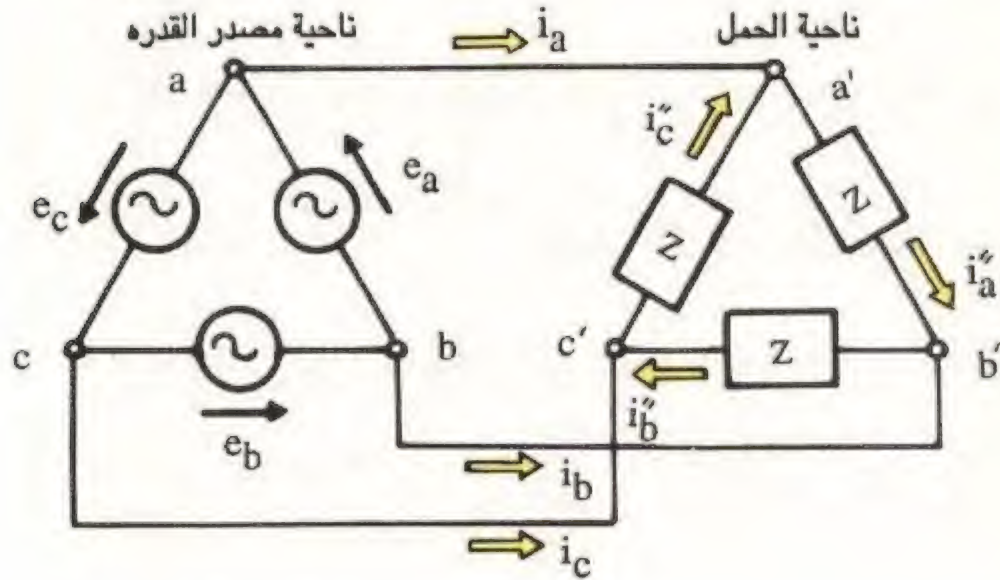
الخطوط الثلاثة (NN') التي ترجع من الحمل إلى مصدر القدرة تحمل مجموع التيارات ($i_a + i_b + i_c$) المارة في كل وجه . وهذا المجموع هو مجموع القيم اللحظية للتيار المتغير ثلاثي الأوجه وهو يساوي صفراً كما وضحنا من قبل . وعلى هذا فإن هذه الخطوط الثلاثة يمكن إزالتها لأن النقطتين N , N' لهما الجهد نفسه . وتعد كل من النقطتين N , N' نقطة تعادل ، والخط N , N' يسمى موصلاً متعادلاً . والدائرة التي بها موصل متعادل تسمى نظاماً ثلاثي الأوجه رباعي الأسلاك . والدائرة التي ليس بها موصل متعادل تسمى نظاماً ثلاثي الأوجه ثلاثي الأسلاك . وإذا استخدمنا طريقة توصيل Y عند كل من مصدر القدرة والحمل فإن ذلك يسمى توصيل Y - Y .



الشكل ٤٧ - ٤ طريقة توصيل Y - Y

أما الشكل ٤٨ - ٤ فيبين طريقة توصيل دلتا أو توصيل المثلث . وفي هذه الطريقة يتم توصيل كل من مصدر القدرة والحمل داخلياً بطريقة دائرية، ثم توصل الأطراف الخارجية في كل من مصدر القدرة والحمل كل طرف بنظيره في الناحية الأخرى . وطريقة توصيل دلتا - دلتا تتطلب استخدام توصيل دلتا في كل من مصدر القدرة والحمل .

بالإضافة إلى ذلك يوجد أيضا طريقة توصيل $Y - \Delta$ وطريقة توصيل $\Delta - Y$.



الشكل ٤٨ - ٤ توصيل $\Delta - \Delta$

ب - دائرة توصيل $Y - Y$

(١) جهد الوجه وجهد الخط

يبين الشكل ٤٩ - ٤ (أ) دائرة توصيل $Y - Y$ حيث جهد الوجه هو القوة الدافعة الكهربائية \dot{E}_a بين الطرفين (a , N) والقوة الدافعة الكهربائية \dot{E}_b بين الطرفين (b , N) والقوة الدافعة الكهربائية \dot{E}_c بين الطرفين (c , N) في مصدر القدرة . هناك أيضاً الجهد \dot{V}_a بين الطرفين (a' , N') والجهد \dot{V}_b بين الطرفين (b' , N') والجهد \dot{V}_c بين الطرفين (c' , N') في الحمل . أما جهد الخط فهو الجهد \dot{V}_{ab} بين الطرفين (a , b) والجهد \dot{V}_{ca} بين الطرفين (c , a) والجهد \dot{V}_{bc} بين الطرفين (b , c) .

ويمكن استنتاج العلاقة بين جهد الوجه وجهد الخط باستخدام القانون الثانى لكيرشوف :

$$\dot{V}_{ab} = \dot{V}_a - \dot{V}_b = V - V \left(\frac{-1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$\begin{aligned}
&= V \left(\frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \sqrt{3} V \angle \left(\frac{\pi}{6} \right) \quad (V) \\
\dot{V}_{bc} &= \dot{V}_b - \dot{V}_c = V \left(\frac{-1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) - V \left(\frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \quad (4-78) \\
&= V (-j \sqrt{3}) = \sqrt{3} V \angle \left(\frac{-2\pi}{3} + \frac{\pi}{6} \right) \quad (V) \\
\dot{V}_{ca} &= \dot{V}_c - \dot{V}_a = V \left(\frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) - V \\
&= V \left(\frac{-3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \sqrt{3} V \angle \left(\frac{-4\pi}{3} + \frac{\pi}{6} \right) \quad (V)
\end{aligned}$$

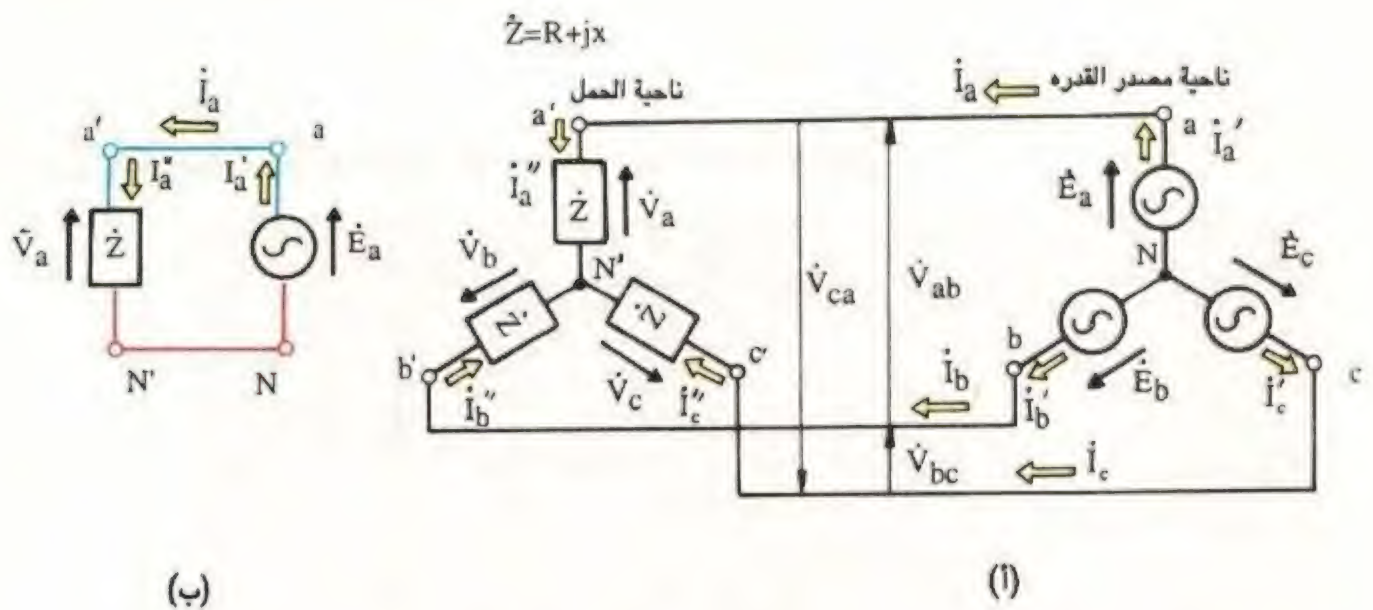
ويمكن استنتاج أيضاً الجزء الخاص بالجهد في رسم المتجهات كما في الشكل ٤ - ٥٠ .
 (أ) عن طريق رسم شكل متجهات جهود الوجه، ثم وضع جهود الخط طبقاً للمعادلة (4-78) .

* لاحظ أن اتجاه جهد الخط هو الاتجاه من الحرف الثاني إلى الحرف الأول في رمز الجهد . فمثلاً اتجاه جهد الخط V_{ab} هو من (b) إلى (a) .

إذا افترضنا أن قيمة جهد الخط هي $V_{\angle} (V)$ وقيمة جهد الوجه هي $V_p (V)$ فإن العلاقة بينهما هي :

$$V_{\angle} = \sqrt{3} V_p \quad (V) \quad (4-79)$$

وطبقاً للمعادلة (4-78) أو الشكل ٤ - ٥٠ (أ) فإن وجه جهد الخط في دائرة توصيل Y - Y يتقدم على جهد الوجه بمقدار $\pi/6$ (rad) .



الشكل ٤ - ٤٩ دائرة توصيل Y - Y

وجهد الخط V_L وجهد الوجه V_p هي كما يلي :

$$|\dot{V}_{ca}| = |\dot{V}_{ab}| = |\dot{V}_{bc}| = V_L, \quad |\dot{V}_a| = |\dot{V}_b| = |\dot{V}_c| = V_p$$

(٢) تيار الوجه وتيار الخط

في دائرة توصيل Y - Y المبينة في الشكل ٤-٤٩ (أ) تسمى التيارات $\dot{I}'_a, \dot{I}'_b, \dot{I}'_c$ المارة في مصدر القدرة والتيارات $(\dot{I}''_a, \dot{I}''_b, \dot{I}''_c)$ المارة في الحمل بتيارات الوجه . أما التيارات $(\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c)$ المارة في خطوط التوصيل من أطراف مصدر القدرة وأطراف الحمل فتسمى تيارات الخط . وعند توصيل Y - Y كما بالشكل ٤ - ٤٩ (أ) لا يوجد تيار الوجه ولتيار الخط فرعاً بين N' , N لجعل القيمتان متساويتان وزاويتا الوجه متساويتان .

لنفترض أن ممانعة أحد الأوجه هي :

$$\dot{Z} = R + jX = Z \angle \phi \quad (\Omega)$$

إذن يمكن حساب تيار الوجه وتيار الخط لهذا الوجه كمايلي :

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a = \dot{I}'_a = \dot{I}''_a &= \frac{\dot{V}_a}{\dot{Z}} = \frac{V \angle j0}{Z \angle j\phi} = \frac{V}{Z} \angle j(-\phi) \quad (A) \\ \dot{I}_b = \dot{I}'_b = \dot{I}''_b &= \frac{\dot{V}_b}{\dot{Z}} = \frac{V \angle j(-2\pi/3)}{Z \angle j\phi} = \frac{V}{Z} \angle j(\frac{-2\pi}{3} - \phi) \quad (A) \\ \dot{I}_c = \dot{I}'_c = \dot{I}''_c &= \frac{\dot{V}_c}{\dot{Z}} = \frac{V \angle j(-4\pi/3)}{Z \angle j\phi} = \frac{V}{Z} \angle j(\frac{-4\pi}{3} - \phi) \quad (A) \end{aligned} \right\} (4-80)$$

حيث Z, ϕ كالآتي :

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (\Omega), \quad \tan \phi = X/R$$

في دائرة توصيل Y - Y إذا كانت قيمة تيار الوجه هي $I_p(A)$ وقيمة تيار الخط هي $I_l(A)$ وقيمة جهد الوجه هي $V_p(V)$ وقيمة ممانعة الحمل هي $Z(\Omega)$ فإن العلاقة بين هذه الكميات تكون كمايلي :

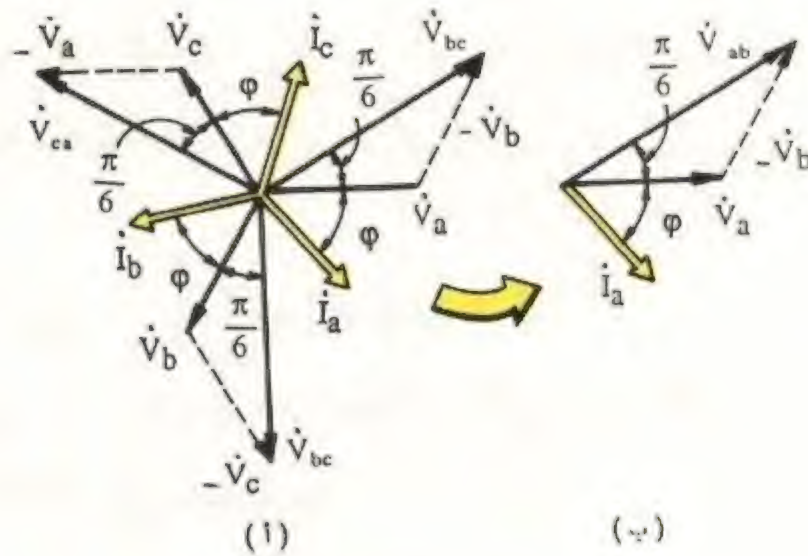
$$I_l = I_p = V_p / Z \quad (4-81)$$

حيث إن تيار الوجه له زاوية وجه تيار الخط نفسها، وتيار الوجه يتأخر عن جهد الوجه بزاوية مقدارها ϕ (زاوية الممانعة) . إذا كان الحمل سعويًا فإن ϕ تكون سالبة ويتقدم التيار على الجهد . وإذا كان تيار الخط هو I_l وتيار الوجه هو I_p فإن :

$$|\dot{I}_a| = |\dot{I}_b| = |\dot{I}_c| = I_l$$

$$|\dot{I}'_a| = |\dot{I}'_b| = |\dot{I}'_c| = |\dot{I}''_a| = |\dot{I}''_b| = |\dot{I}''_c| = I_p$$

وعند استخدام حمل متوازن في دوائر التيار المتغير ثلاثي الأوجه المتماثل كما في الشكل ٤-٤٩ (ب) فإن قيمة (I_l) وزاوية (ϕ) لتيار الخط I_a يمكن حسابها باستخدام دائرة وجه واحد بها خط التعادل الواصل بين نقطتي التعادل N, N' .



الشكل ٤-٥٠ رسم المتجهات لتوصيل Y - Y .

ويمكن استنتاج رسم المتجهات الخاص بالمعادلة (4-80) بسهولة إذا علمنا أن تيار الخط I_b يتأخر بزاوية عن I_a وتيار الخط I_c يتأخر بالزاوية نفسها عن I_b .

مثال هـ

يبين الشكل ٤-٥١ دائرة توصيل Y - Y بها حمل متوازن ومصدر قدرة

ثلاثي الأوجه متوازن . حيث جهد الوجه هو : $E_a = \dot{V}_a = 100 \angle 0^\circ$ (V)

وممانعة الحمل هي : $Z = 5\sqrt{3} + j5$ (Ω)

أجب عن الأسئلة الآتية :

(١) احسب جهود الخط $\dot{V}_{ca} (V)$, $\dot{V}_{bc} (V)$, $\dot{V}_{ab} (V)$

(٢) احسب تيارات الخط $\dot{I}_c (A)$, $\dot{I}_b (A)$, $\dot{I}_a (A)$

(٣) احسب تيارات وجه الحمل $\dot{I}''_c (A)$, $\dot{I}''_b (A)$, $\dot{I}''_a (A)$

(٤) ارسم متجهات الجهد والتيار بالقياس إلى $\dot{V}_a (V)$

الحل

(١) قيمة جهد الوجه : $V = E = 100 (V)$

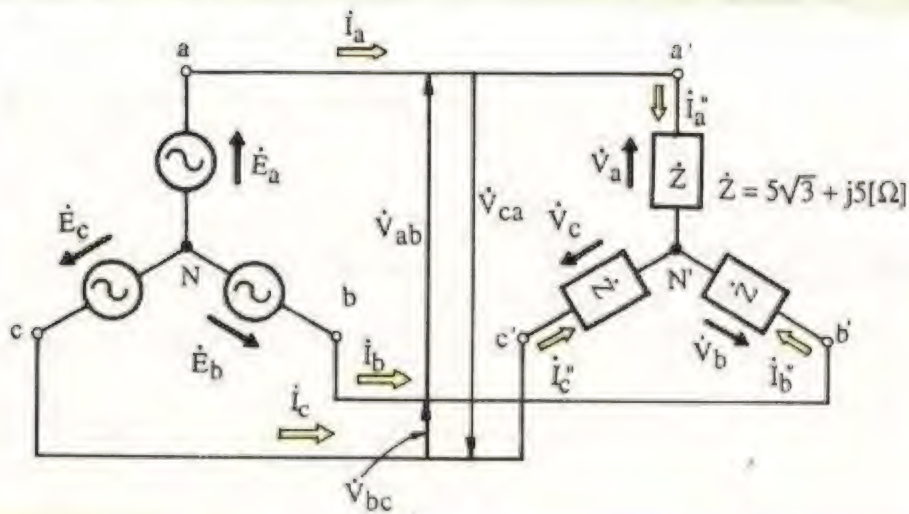
قيمة جهد الخط : $V_l = \sqrt{3} V = \sqrt{3} \times 100 = 173 (V)$

زاوية تيار الخط تتقدم على جهد الوجه

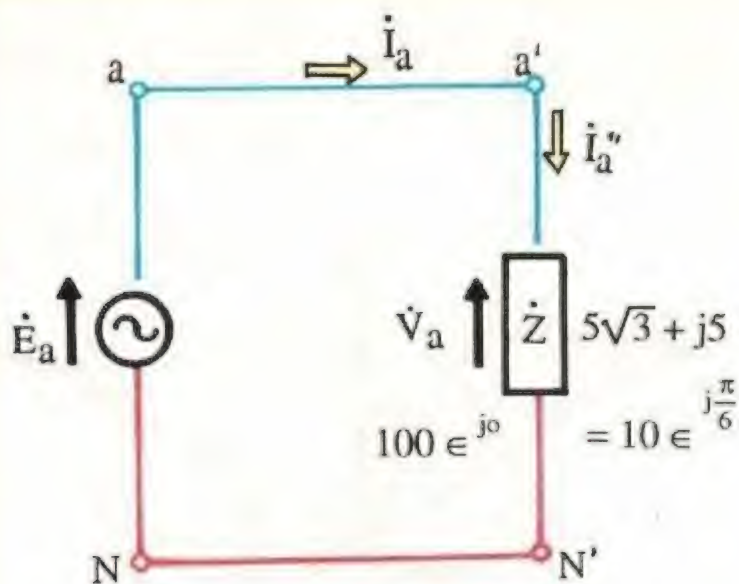
$$\dot{V}_{ab} = 173 \angle j\pi/6 (V)$$

$$\dot{V}_{bc} = 173 \angle j(-\frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{6}) (V)$$

$$\dot{V}_{ca} = 173 \angle j(-\frac{4\pi}{3} + \frac{\pi}{6}) (V)$$



الشكل ٤ - ٥ دائرة توصيل Y - Y



الشكل ٤ - ٥٢ دائرة وجه واحد

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(5\sqrt{3})^2 + (5)^2} = 10 \, \Omega \quad (٢)$$

$$\tan \phi = \frac{1}{\sqrt{3}} \rightarrow \phi = \frac{\pi}{6} \text{ rad}$$

$$\dot{Z} = 10 \angle j\pi/6 \, (\Omega), \quad \dot{I}_a = \frac{\dot{V}_a}{\dot{Z}} = \frac{100 \angle j0}{10 \angle j\pi/6} = 10 \angle j(-\pi/6) \quad (A) \quad (A)$$

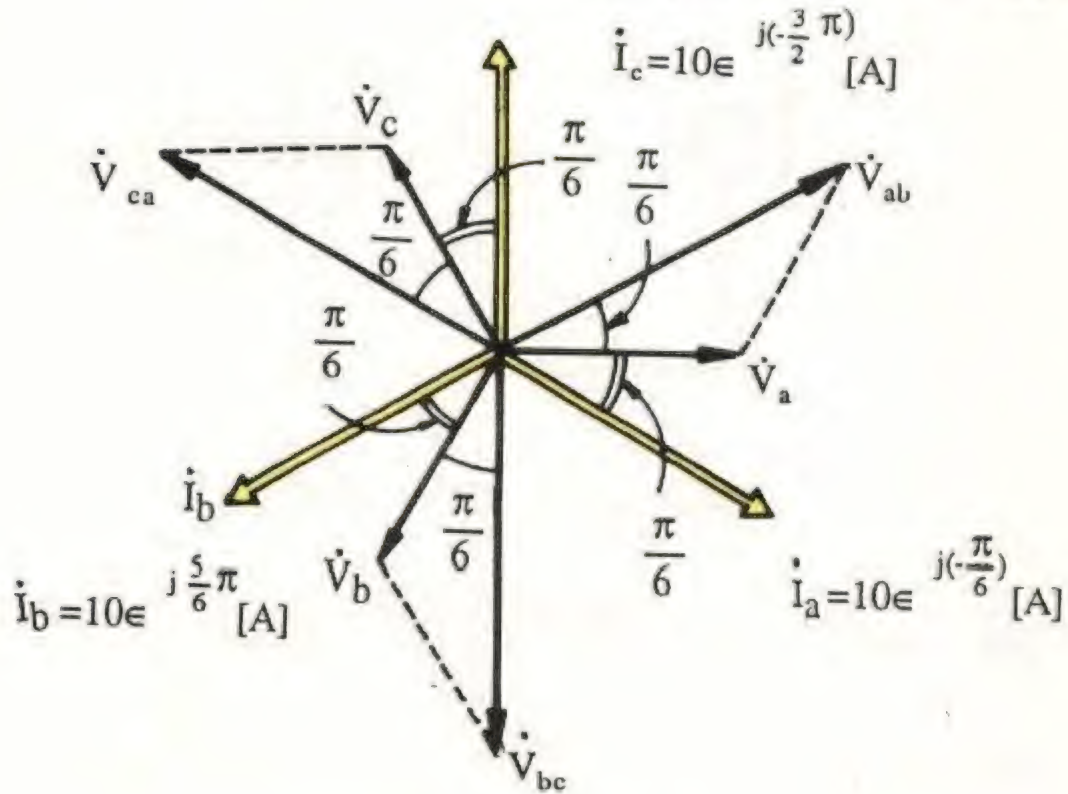
$$\dot{I}_b = 10 \angle j\left(\frac{-2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right) = 10 \angle j\left(\frac{-5\pi}{6}\right) \quad (A)$$

$$\dot{I}_c = 10 \angle j\left(\frac{-4\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right) = 10 \angle j\left(-\frac{3}{2}\pi\right) \quad (A)$$

(٣) تيار الخط في دائرة توصيل Y - Y هو نفسه تيار الوجه أي إن :

$$\dot{I}''_a = \dot{I}_a , \quad \dot{I}''_b = \dot{I}_b , \quad \dot{I}''_c = \dot{I}_c \quad (A)$$

(٤) يبين الشكل ٤ - ٣ رسم المتجهات



الشكل ٤ - ٣ رسم المتجهات

سؤال ٢٦

في دائرة توصيل Y - Y ممانعة الحمل قيمتها $\dot{Z} = 30 + j40 (\Omega)$

وجهد الخط 200(V) . احسب قيمة وزاوية تيار الخط وارسم متجهات الجهد والتيار .

ح - دائرة توصيل دلتا - دلتا (Δ - Δ) Delta-Delta connection circuit

(١) جهد الوجه وجهد الخط

فى دائرة توصيل دلتا - دلتا يوصل الحمل المتوازن مع القوى الدافعة الكهربائية ثلاثية الأوجه كما فى الشكل ٤ - ٥٤ (أ) .

ويمكن كتابة جهود الخط $\dot{V}_{ca} (V)$, $\dot{V}_{bc} (V)$, $\dot{V}_{ab} (V)$ وجهود الوجه $\dot{V}_c (V)$, $\dot{V}_b (V)$, $\dot{V}_a (V)$ كما يلي:

$$\dot{V}_{ab} = \dot{V}_a = \dot{E}_a , \dot{V}_{bc} = \dot{V}_b = \dot{E}_b , \dot{V}_{ca} = \dot{V}_c = \dot{E}_c \quad (4-82)$$

وفى توصيل دلتا - دلتا تكون قيمة جهد الخط $V_{\text{خط}}$ مساوية لقيمة جهد الوجه V_p وتكون زاوية جهد الخط مساوية لزاوية جهد الوجه، ونحصل على العلاقة الآتية :

$$V_{\text{خط}} = V_p (V) \quad (4-83)$$

(٢) تيار الوجه وتيار الخط

عند استخدام توصيل الدلتا فى كل من مصدر القدرة والحمل فإن :

$$\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = 0 , \dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c = 0$$

ولا يوجد تيار دائرى فى الدائرة المغلقة الناتجة من توصيل الدلتا فى كل من مصدر القدرة والحمل . ويمكن حساب قيمة تيارات الوجه $\dot{I}'_c (A)$, $\dot{I}'_b (A)$, $\dot{I}'_a (A)$ فى مصدر القدرة وتيارات الوجه $I''_c (A)$, $I''_b (A)$, $I''_a (A)$ فى الحمل على أساس تحليل دائرة الوجه الواحد المبينة فى الشكل ٤ - ٥٤ (ب) .

$$\begin{aligned} \dot{I}'_a = \dot{I}''_a = \frac{\dot{E}_a}{Z} = \frac{\dot{V}_a}{Z \angle j\phi} = \frac{V}{Z} \angle j(-\phi) = I \angle j(-\phi) \\ \dot{I}'_b = \dot{I}''_b = \frac{\dot{E}_b}{Z} = \frac{\dot{V}_b}{Z \angle j\phi} = \frac{V}{Z} \angle j\left(\frac{-2\pi}{3} - \phi\right) = I \angle j\left(\frac{-2\pi}{3} - \phi\right) (A) \end{aligned} \quad (4-84)$$

$$\dot{I}'_c = \dot{I}''_c = \frac{\dot{E}_c}{Z} = \frac{\dot{V}_c}{Z \epsilon^{j\phi}} = \frac{V}{Z} \epsilon^{j(-\frac{4}{3}\pi - \phi)} = I \epsilon^{j(-\frac{4}{3}\pi - \phi)} \quad (A)$$

حيث $\dot{Z} = R + jX = Z \epsilon^{j\phi}$, $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ (Ω) , $\tan \phi = X / R$ وإذا كانت قيمة تيار الوجه هي $I_p(A)$ وقيمة جهد الوجه هي $V_p(V)$ فإن العلاقة بينهما تكون كمايلي :

$$I_p = \frac{V_p}{Z} \quad (4-85)$$

حيث تتأخر زاوية تيار الوجه عن زاوية جهد الوجه بمقدار زاوية الممانعة ϕ .

ويبين الشكل ٤-٥٤ (ج) كيفية استنتاج تيارات الخط $\dot{I}_c(A)$, $\dot{I}_b(A)$, $\dot{I}_a(A)$ في دائرة توصيل دلتا - دلتا عن طريق ازواج الخط على أساس توصيل أطراف مصدر القدرة c, b, a إلى الأطراف المناظرة في الحمل c', b', a' , وتكون معادلة تيار الخط كمايلي :

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}'_a - \dot{I}'_c = \dot{I}''_a - \dot{I}''_c = I \epsilon^{j(-\phi)} - I \epsilon^{j(\frac{-4\pi}{3} - \phi)} \\ &= \sqrt{3} I \epsilon^{j(\frac{-\pi}{6} - \phi)} \quad \{ A \} \\ \dot{I}_b &= \dot{I}'_b - \dot{I}'_a = \dot{I}''_b - \dot{I}''_a = I \epsilon^{j(\frac{-2\pi}{3} - \phi)} - I \epsilon^{j(-\phi)} \\ &= \sqrt{3} I \epsilon^{j(\frac{-2\pi}{3} - \frac{\pi}{6} - \phi)} \quad (A) \end{aligned} \quad (4-86)$$

ويمكن حساب تيار الخط في المعادلة (4-86) باستخدام رسم المتجهات في الشكل ٤-٥٥ واستخدام الدوال المثلثية كما يلي :

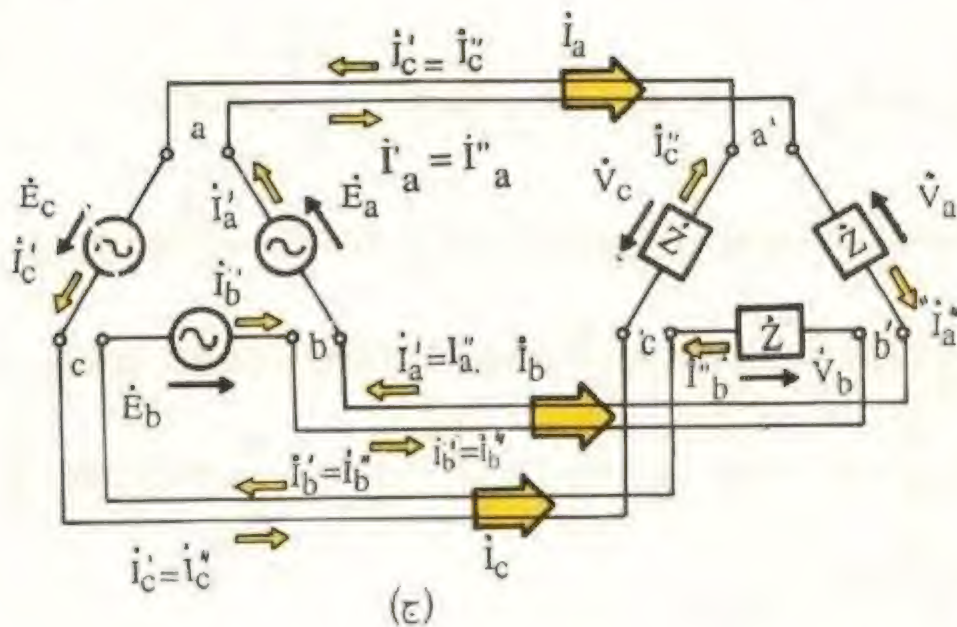
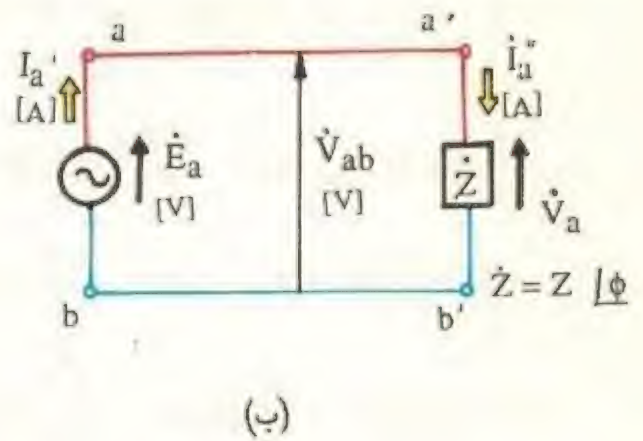
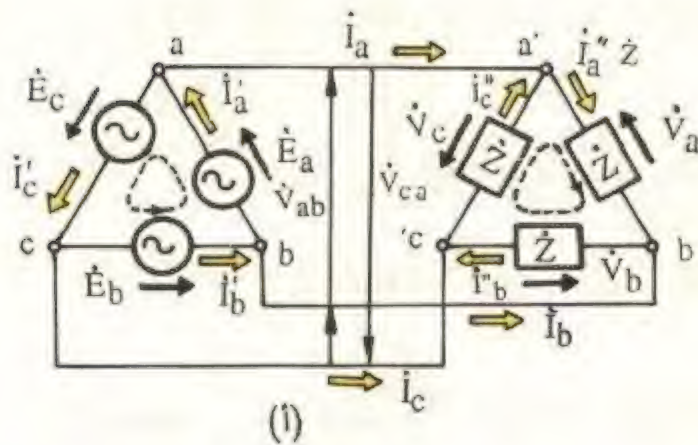
$$\dot{I}_a = \dot{I}'_a - \dot{I}'_c = \dot{I}''_a - \dot{I}''_c = I \epsilon^{j(-\phi)} - I \epsilon^{j(\frac{-4\pi}{3} - \phi)}$$

$$\begin{aligned}
&= I \{ \cos(-\phi) + j \sin(-\phi) \} - I \{ \cos(\frac{-4\pi}{3} - \phi) + j \sin(\frac{-4\pi}{3} - \phi) \} \\
&= I \left[\cos \phi - \left\{ \cos(\frac{-4\pi}{3}) \cos \phi + \sin(\frac{-4\pi}{3}) \sin \phi \right\} \right] \\
&\quad + j I \{ \sin(-\phi) - \sin(\frac{-4\pi}{3}) \cos \phi + \cos(\frac{-4\pi}{3}) \sin \phi \} \\
&= I \{ \cos \phi - (\frac{-1}{2} \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \phi) + j (-\sin \phi - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \phi - \frac{1}{2} \sin \phi) \} \\
&= I \{ (\frac{3}{2} \cos \phi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \phi) - j (\frac{3}{2} \sin \phi + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \phi) \} \\
&= \sqrt{3} I \{ (\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \phi - \frac{1}{2} \sin \phi) - j (\frac{1}{2} \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \phi) \} \\
\dot{I}_a &= \sqrt{3} I \{ (\cos \frac{\pi}{6} \cos \phi - \sin \frac{\pi}{6} \sin \phi) - j (\sin \frac{\pi}{6} \cos \phi + \cos \frac{\pi}{6} \sin \phi) \} \\
&= \sqrt{3} I \{ \cos(\frac{\pi}{6} + \phi) - j \sin(\frac{\pi}{6} + \phi) \} = \sqrt{3} I \{ \cos(\frac{-\pi}{6} - \phi) + j \sin(\frac{-\pi}{6} - \phi) \} \\
&= \sqrt{3} I e^{j(\frac{-\pi}{6} - \phi)} \quad (A)
\end{aligned}$$

وبطريقة مماثلة يمكن حساب كل من \dot{I}_c , \dot{I}_b

$$\begin{aligned}
\dot{I}_c &= \dot{I}'_c - \dot{I}'_b = \dot{I}''_c - \dot{I}''_b = I e^{j(\frac{-4\pi}{3} - \phi)} - I e^{j(\frac{-2\pi}{3} - \phi)} \\
&= \sqrt{3} I e^{j(\frac{-4\pi}{3} - \frac{\pi}{6} - \phi)} \quad (A)
\end{aligned}$$

بقية
المعادلة
(4-86)



الشكل ٤ - ٤ ه دائرة توصيل دلتا - دلتا ($\Delta - \Delta$)

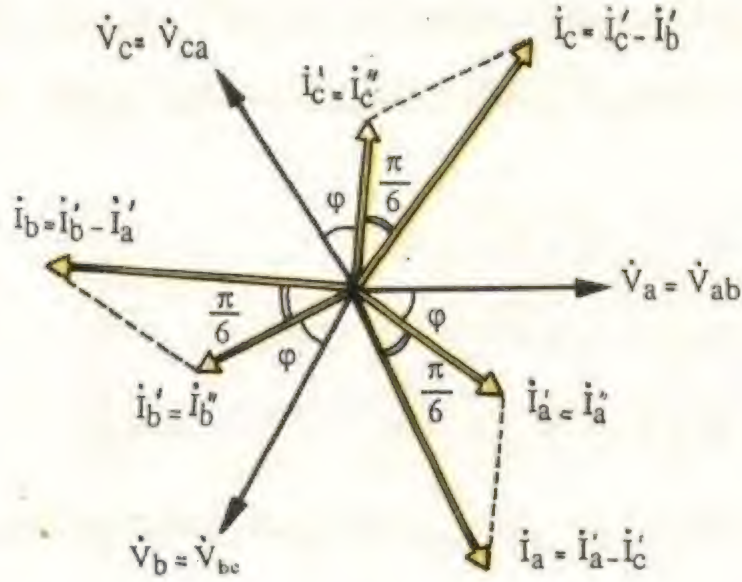
إذا فرضنا أن قيمة تيار في دائرة توصيل دلتا - دلتا هي $I_{\phi}(A)$ وقيمة تيار الوجه هي $I_p(A)$ فإن العلاقة بينهما تكون كمايلي :

$$I_{\phi} = \sqrt{3} I_p \quad (4-87)$$

حيث يتأخر تيار الخط عن تيار الوجه بزاوية مقدارها $\pi/6(\text{rad})$. وقيمة تيار الخط تكون كمايلي :

$$|I_a| = |I_b| = |I_c| = I_{\phi}$$

ويبين الشكل ٤ - ٥٥ رسم المتجهات للعلاقة بين الجهد والتيار .



الشكل ٤ - ٥٥ رسم المتجهات في توصيل دلتا - دلتا ($\Delta - \Delta$)

سؤال ٢٧

احسب تيار الخط في حمل متوازن ثلاثي الأوجه في دائرة توصيل دلتا - دلتا إذا كانت قيمة تيار الوجه 5 أمبير .

سؤال ٢٨

يقوم مصدر قدرة متغير ثلاثي الأوجه بجهود خط قيمته 200(V) بتغذية ممانعة ($Z = 40 + j 30 \Omega$) بتوصيل دلتا . احسب تيارات الوجه والتيارات الخط في هذا الحمل .

د- دائرة توصيل في - دلتا ($V - \Delta$)

يبين الشكل ٤ - ٥٦ توصيل V بحذف أحد الأوجه (الوجه C في هذا الشكل) من توصيل دلتا في مصدر القدرة . وباستخدام القانون الثاني لكيرشوف يمكننا حساب جهد الخط كما يلي :

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{ab} &= \dot{E}_a = \dot{V}_a = V \epsilon^{j0} [V] \\ \dot{V}_{bc} &= \dot{E}_b = \dot{V}_b = V \epsilon^{j(-2\pi/3)} [V] \\ \dot{V}_{ca} &= -(\dot{E}_a + \dot{E}_b) = \dot{V}_c = V \epsilon^{j(-4\pi/3)} [V] \end{aligned} \right\} (4-88)$$

حيث يتبين من المعادلة السابقة أن الجهد المتغير ثلاثي الأوجه يمكن الحصول عليه من مصدر قدرة ثنائي الأوجه .

وإذا فرضنا أن قيمة جهد الخط هي $V_{\text{خط}} [V]$ وقيمة جهد الوجه هي $V_p [V]$ فإن العلاقة بينهما تكون كما يلي :

$$V_{\text{خط}} = V_p [V] \quad (4-89)$$

وتكون قيمة جهد الخط في توصيل $V - \Delta$ تساوي قيمة جهد الوجه .

ويمكن كتابة تيار الخط (على أساس توصيل دلتا للحمل) كما يلي :

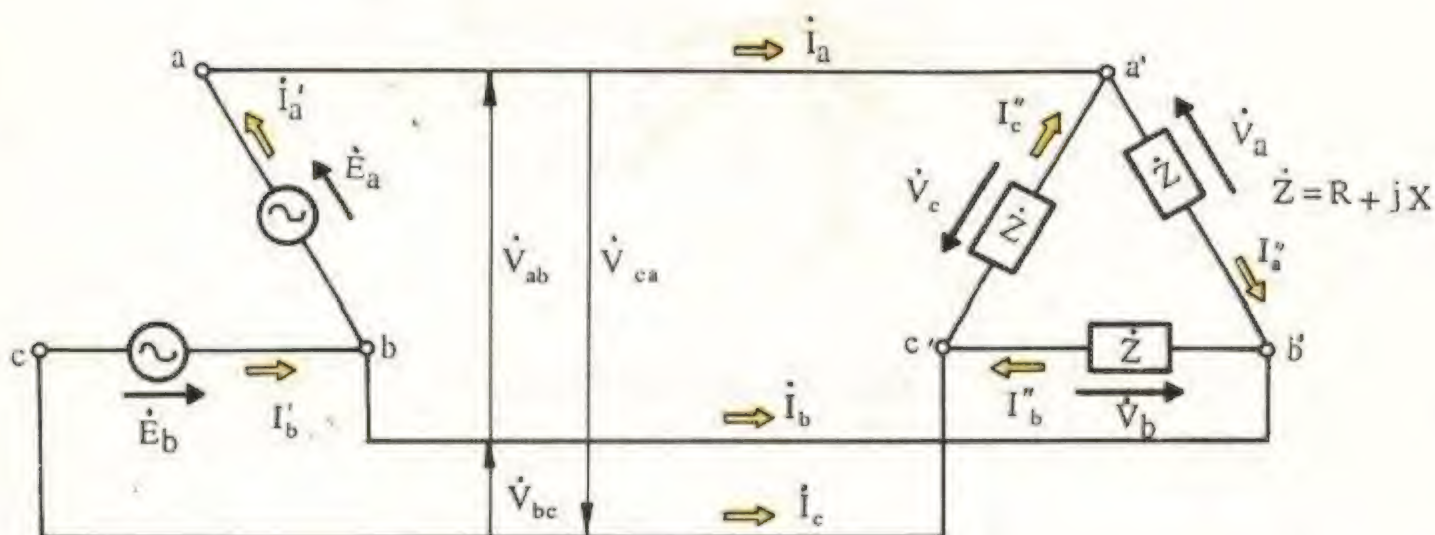
$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}'_a = \dot{I}''_a - \dot{I}''_c = \sqrt{3} I'' \epsilon^{j(\frac{-\pi}{6} - \phi)} [A] \\ \dot{I}_b &= \dot{I}'_b - \dot{I}'_a = \dot{I}''_b - \dot{I}''_a = \sqrt{3} I'' \epsilon^{j(\frac{-2\pi}{3} - \frac{\pi}{6} - \phi)} [A] \\ \dot{I}_c &= -\dot{I}'_b = \dot{I}''_c - \dot{I}''_b = \sqrt{3} I'' \epsilon^{j(\frac{-4\pi}{3} - \frac{\pi}{6} - \phi)} [A] \end{aligned} \right\} (4-90)$$

حيث

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} , \quad I'' = V_p / Z , \quad \tan \phi = X / R$$

وإذا افترضنا أن قيمة تيار الخط هي $I' [A]$ وقيمة تيار الوجه في مصدر القدرة هي $I' [A]$ وقيمة تيار الوجه في الحمل هي $I_p (=I'') [A]$ فإن العلاقة بينها تكون كمايلي :

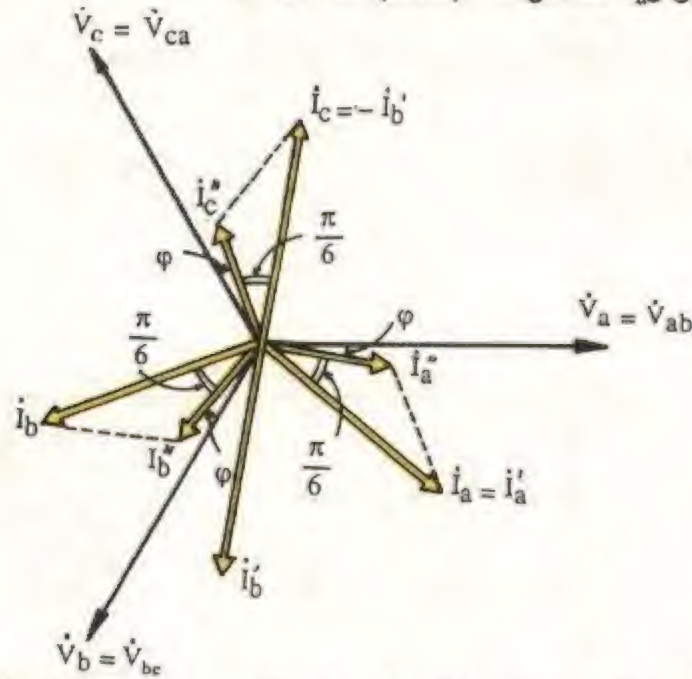
$$I' = I'' = \sqrt{3} I_p \quad [A] \quad (4 - 91)$$



الشكل ٤ - ٥٦ دائرة توصيل في - دلتا (V - Δ)

* لحساب تيار الخط في المعادلة (4 - 90) نستخدم العلاقة (4 - 86) بين تيار الخط وتيار الوجه في دائرة توصيل دلتا - دلتا .

نستنتج مما سبق أن قيمة تيار الخط في توصيل في - دلتا تساوى قيمة تيار الوجه في مصدر القدرة ، وتساوي 3 مضروبة في قيمة تيار الوجه في الحمل . ويتأخر تيار الخط عن تيار الوجه في الحمل بزاوية مقدارها $\pi / 6$ (rad) .



الشكل ٤ - ٥٧ رسم المتجهات في توصيل في - دلتا ($V - \Delta$)

وإذا افترضنا أن تيار الخط هو I_l وتيار الوجه في مصدر القدرة هو $I' [A]$ وتيار الوجه في الحمل هو I_p فإن قيم هذه التيارات تكون كما يلي :

$$|I_a| = |I_b| = |I_c| = I_l, \quad |I'_a| = |I'_b - I'_a| = |-I'_b| = I', \quad |I''_a| = |I''_b| = |I''_c| = I_p$$

ويبين الشكل ٤ - ٥٧ رسم المتجهات للعلاقة بين الجهد والتيار .

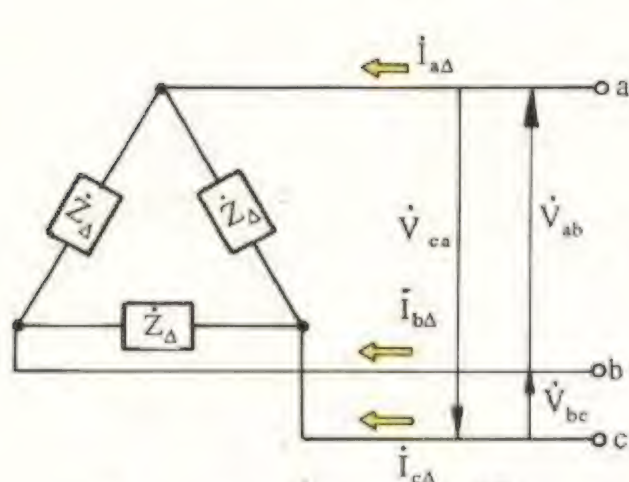
وكثيراً ما يستخدم توصيل V كمصدر للقدرة ثلاثي الأوجه في المحطات الفرعية الصغيرة عند حدوث عطل في إحدى الوحدات بين المحولات أو في حالات التطوير المستقبلي .

هـ - تحويل توصيل الحمل من Y إلى دلتا وبالعكس .

في حالة وجود توصيل مختلف لمصدر القدرة عن الحمل، مثلاً توصيل الحمل بطريقة Y

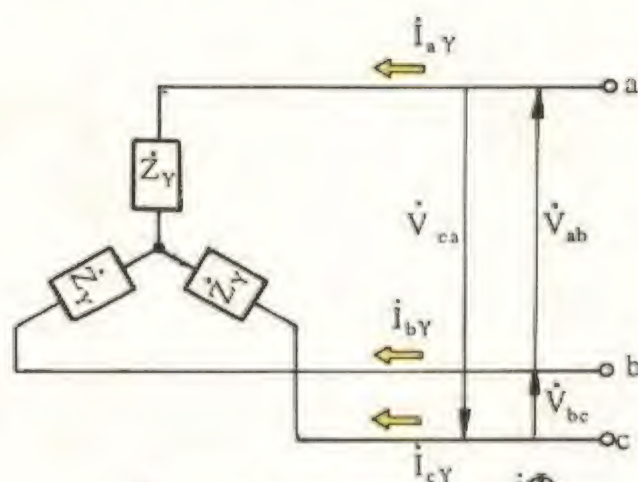
بينما مصدر القدرة بطريقة دلتا يحتاج لحساب حمل دلتا المكافئ لحمل Y لاستخدامه مع مصدر القدرة المتصل بطريقة دلتا .

ويبين الشكلان ٤ - ٨ (أ) و ٤ - ٨ (ب) الدوائر التي تستخدم مع الجهد المتغير ثلاثي الأوجه نفسه ، وهي حمل متوازن ثلاثي الأوجه في توصيل Y وفي توصيل دلتا . والدائرتان متكافئتان فتمر التيارات نفسها بصرف النظر عن نوع توصيل الحمل .



$$\dot{Z}_{\Delta} = R_{\Delta} + jx_{\Delta} = Z_{\Delta} \angle \Phi$$

(ب)



$$\dot{Z}_Y = R_Y + jx_Y = Z_Y \angle \Phi$$

(ل)

الشكل ٤ - ٨ التحويل Y - delta conversion (Y - Δ)

في توصيل الشكل ٤ - ٨ (أ) والشكل ٤ - ٨ (ب) نفترض أن تيارات الخط هي $I_{\Delta} \angle \phi_{\Delta}$ (A) ، $I_Y \angle \phi_Y$ (A) وأن جهد الخط هو $V_{\Delta} \angle \phi_{\Delta}$ (V) فيمكننا أن نستنتج العلاقات الآتية باستخدام المعادلات (4 - 80) ، (4 - 86) :

$$|I_{aY}| = |I_{bY}| = |I_{cY}| = I_{Y\angle}, \quad |I_{b\Delta}| = |I_{a\Delta}| = |I_{c\Delta}| = I_{\Delta\angle}$$

$$|V_{ab}| = |V_{bc}| = |V_{ca}| = V_{\Delta\angle}$$

$$I_{\Delta\angle} = \frac{V_{\Delta\angle}}{\sqrt{3} Z_Y \angle \Phi} = \frac{V_{\Delta\angle}}{\sqrt{3} Z_Y} \angle j(-\phi - \frac{\pi}{6}) \quad (A) \quad (4 - 92)$$

$$\dot{I}_{/\Delta} = \frac{\dot{V}_{ab}}{\dot{Z}_{\Delta}} - \frac{\dot{V}_{ca}}{\dot{Z}_{\Delta}} = \sqrt{3} \frac{V_{/}}{Z_{\Delta}} \angle j(-\phi - \frac{\pi}{6}) = \frac{V_{/}}{\frac{Z_{\Delta}}{\sqrt{3}}} \angle j(-\phi - \frac{\pi}{6}) \quad (A) \quad (4-93)$$

حيث تصبح الأحمال في الدائرتين متكافئة إذا كان $\dot{I}_{/\Delta}$, $\dot{I}_{/Y}$ في المعادلات السابقة متساويان ($I_{/Y} = I_{/\Delta}$) ويكون :

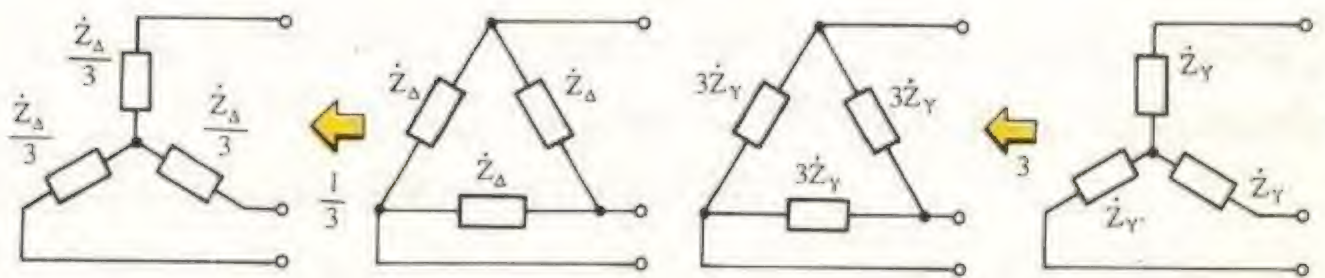
$$\frac{V_{/}}{\sqrt{3} Z_Y} \angle j(-\phi - \frac{\pi}{6}) = \frac{V_{/}}{\frac{Z_{\Delta}}{\sqrt{3}}} \angle j(-\phi - \frac{\pi}{6})$$

وعليه ،

$$\sqrt{3} \dot{Z}_Y = \dot{Z}_{\Delta} / \sqrt{3}$$

$$3 \dot{Z}_Y = \dot{Z}_{\Delta} \text{ or } \dot{Z}_Y = \dot{Z}_{\Delta} / 3 \quad (4-94)$$

أي إنه عند استخدام توصيل Y المكافئ بدلاً من توصيل دلتا نحتاج إلى 1/3 قيمة الممانعة. وتتضح هذه العلاقات من الشكل ٤ - ٥٩ .



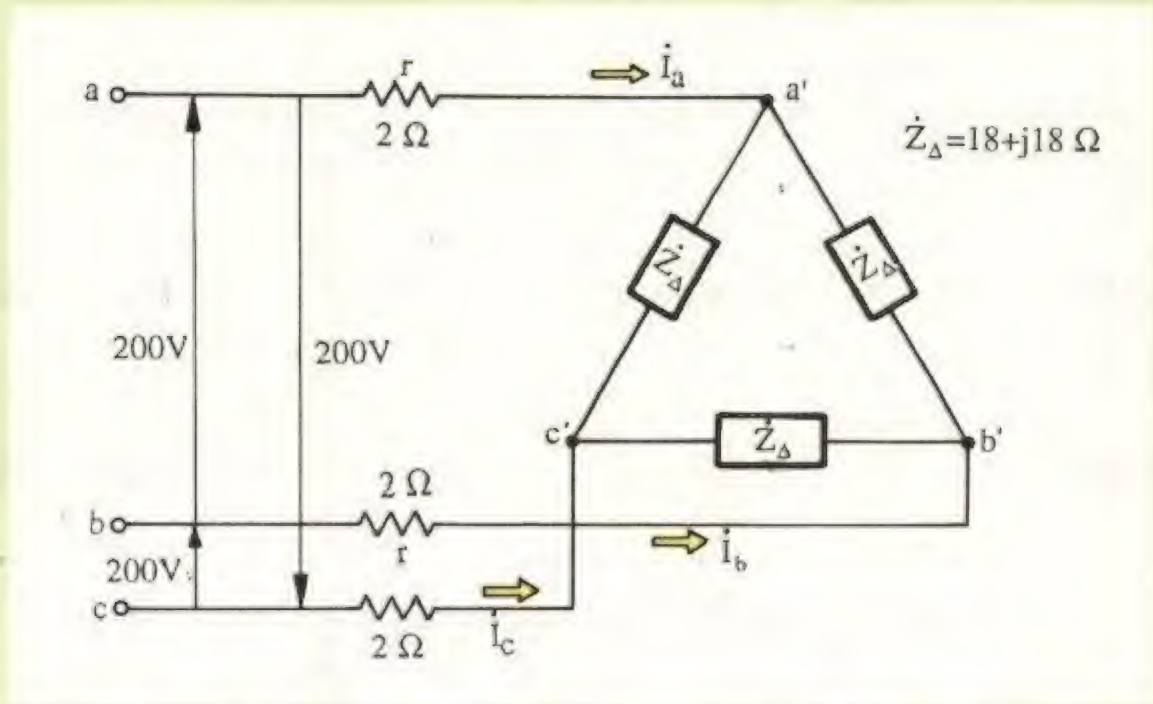
(ب) التحويل من دلتا إلى Y

(أ) التحويل من Y إلى دلتا

الشكل ٤ - ٥٩ تحويل توصيل الحمل من Y إلى دلتا وبالعكس .

مثال ٦

فى الدائرة المبينة بالشكل ٤ - ٦٠ يقوم جهد متغير ثلاثى الأوجه متماثل قيمته 200 V بتغذية الحمل المتصل بطريقة دلتا. فإذا كانت ممانعة وجه الأحمال هى $\dot{Z} = 18 + j18 (\Omega)$ ومقاومة كل خط هى $2 (\Omega)$ ، احسب تيارات الخط .



الشكل ٤ - ٦٠ حمل ثلاثى الأوجه توصيل دلتا .

الحل

نقوم بتحويل الحمل بتوصيلة دلتا إلى توصيلة Y كما فى الشكل ٤-٦١

$$\dot{Z}_Y = \dot{Z}_\Delta / 3 = 6 + j6 (\Omega) , \quad \dot{Z} = r + \dot{Z}_Y = 2 + 6 + j6 = 8 + j6 (\Omega)$$

$$V_p = V_L / \sqrt{3} = 200 / \sqrt{3} = 116 (V) \quad \text{قيمة الجهد :}$$

$$Z = \sqrt{(8)^2 + (6)^2} = 10 (\Omega) , \quad I_L = V / Z = 116 / 10 = 11.6 (A) \quad \text{وقيمة تيار الخط :}$$

$$\tan \phi = 6/8 \rightarrow \phi = 36.9^\circ$$

وقيمة الزاوية ϕ :

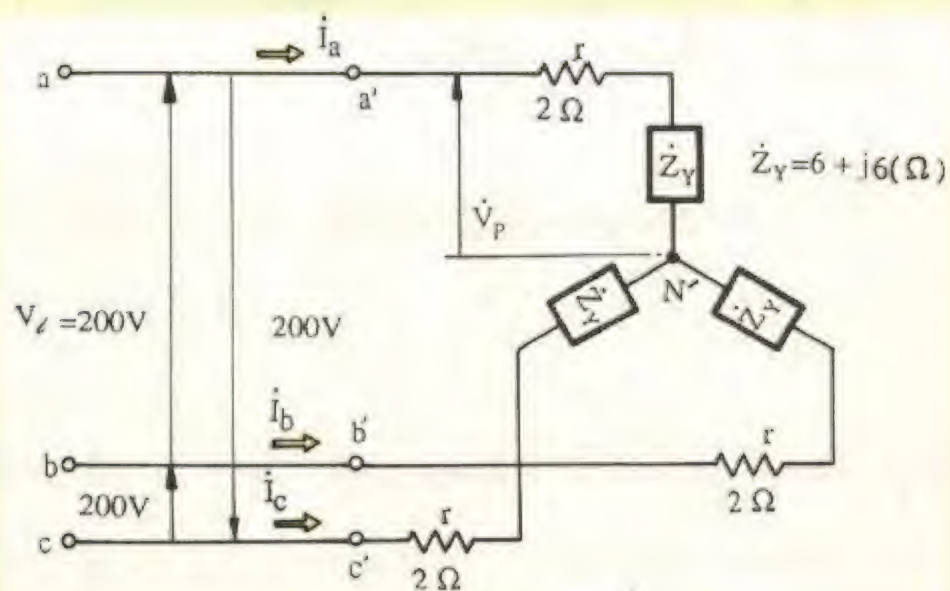
$$I_{\angle} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{116 \angle^{j0}}{10 \angle^{j\phi}} = 11.6 \angle^{j(-\phi)} \quad (A)$$

وتكون تيارات الخط كما يلي

$$\dot{I}_a = 11.6 \angle^{j(-\frac{\pi}{6} - \phi)} \quad (A), \quad -\frac{\pi}{6} - \phi = -66.9^\circ$$

$$\dot{I}_b = 11.6 \angle^{j(-\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6} - \phi)} = 11.6 \angle^{j(-\frac{5\pi}{6} - \phi)} \quad (A), \quad -\frac{5\pi}{6} - \phi = -186.9^\circ$$

$$\dot{I}_c = 11.6 \angle^{j(-\frac{4\pi}{3} - \frac{\pi}{6} - \phi)} = 11.6 \angle^{j(-\frac{3\pi}{2} - \phi)} \quad (A), \quad -\frac{3\pi}{2} - \phi = -306.9^\circ$$



الشكل ٤ - ٦١ حمل Y المكافئ

سؤال ٢٩

يقوم مصدر قدرة يستخدم توصيل Y وجهه قيمته $100(V)$ بتغذية حمل توصيل دلتا ممانعته $Z = 15\sqrt{3} + j15 (\Omega)$. احسب التيار في كل خط .

٤ - ٥ - ٣ القدرة ثلاثية الأوجه

١- التعبير عن القدرة ثلاثية الأوجه

القدرة المستهلكة في دائرة التيار المتغير ثلاثي الأوجه تسمى القدرة ثلاثية الأوجه . وهذه يمكن حسابها باستخدام الطريقة التي استخدمناها لحساب القدرة في دائرة التيار المتغير ذات الوجه الواحد في توصيل Y أو توصيل دلتا . ويمكن استنتاج القيمة اللحظية P للقدرة ثلاثية الأوجه بتجميع حاصل ضرب القيمة اللحظية للجهد في القيمة اللحظية للتيار في كل وجه أي إن P تكون كما يلي :

$$P = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (W)$$

حيث يمكن إيجاد القدرة في دائرة التيار المتغير ثلاثي الأوجه مع حمل متوازن عن طريق ضرب القيمة المتوسطة لقدرة الوجه الواحد في 3 على افتراض أن القيمة المتوسطة للقدرة متساوية في كل وجه . فإذا كان جهد الوجه هو $V_p(V)$ والتيار الوجه هو $I_p(A)$ ومعامل قدرة الحمل هو $\cos \phi$ فإن القدرة ثلاثية الوجه $P(W)$ تكون كما يلي :

$$P = 3 V_p I_p \cos \phi \quad (W) \quad (4-95)$$

أما القدرة غير الفعالة $Q(var)$ والقدرة الظاهرة $S(VA)$ فمعادلاتها كمايلي :

$$Q = 3 V_p I_p \sin \phi \quad (var) \quad (4-96)$$

$$S = 3 V_p I_p \quad [VA] \quad (4-97)$$

أما بالنسبة لحمل توصيل Y فإن العلاقة بين جهد الخط $V_L(V)$ و تيار الخط $I_L(A)$ وجهد الوجه $V_p(V)$ وتيار الوجه $I_p(A)$ تصبح كما يلي :

$$V_L = \sqrt{3} V_p , I_L = I_p \quad (4 - 98)$$

وبتعويض المعادلة (4 - 98) في المعادلة (4 - 95) نحصل على قيمة القدرة ثلاثية الأوجه $P \{ W \}$ كما يلي :

$$P = 3 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} V_L I_L \cos \phi = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi \quad (4 - 99)$$

وبالنسبة لحمل توصيل دلتا فإن العلاقة بين الجهود والتيارات تكون كما يلي :

$$V_L = V_p , I_L = \sqrt{3} I_p \quad (4 - 100)$$

وبتعويض المعادلة (4 - 100) في المعادلة (4 - 95) نحصل على القدرة ثلاثية الأوجه :

$$P = 3 V_L \frac{1}{\sqrt{3}} I_L \cos \phi = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi \quad (4 - 101)$$

ب - القدرة ثلاثية الأوجه Three phase power

من العلاقات (4 - 99) , (4 - 101) يمكن التعبير عن القدرة ثلاثية الأوجه كما يلي بصرف النظر عن توصيل الحمل :

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \text{power factor} \quad (4 - 102)$$

أما القدرة غير الفعالة ثلاثية الأوجه $Q \{ \text{var} \}$ والقدرة الظاهرة ثلاثية الأوجه $S \{ VA \}$ فمعادلاتها كما يلي :

$$\left. \begin{aligned} Q &= \sqrt{3} V_L I_L \sin \phi \quad (\text{var}) \\ S &= \sqrt{3} V_L I_L \quad (VA) \end{aligned} \right\} \quad (4 - 103)$$

وتستخدم القدرة ثلاثية الأوجه للسعات الكبيرة ووحدات قياسها هي كيلوات { kW } وميجاوات { MW } .

سؤال ٣٠

يقوم مصدر قدرة ثلاثي الأوجه له جهد خط قيمته $200[V]$ بتغذية حمل توصيلي دلتا ممانعة كل وجه فيه قيمتها $\dot{Z} = 4 + j3 [\Omega]$. احسب القدرة ثلاثية الأوجه ، والقدرة غير الفعالة ، والقدرة الظاهرة في الحمل .

سؤال ٣١

في السؤال السابق نفترض الممانعة نفسها في توصيل Y . احسب القدرة ثلاثية الأوجه P والقدرة غير الفعالة Q والقدرة الظاهرة S في الحمل .

٤ - ٦ المجال المغناطيسي الدوار Revolving magnetic field

كما درسنا في الفصل الثاني ، عند مرور تيار في موصل يتولد مجال مغناطيسي حوله في اتجاه يتبع قاعدة البريمة اليمنى لأمبير . وعند مرور تيار في موصل موضوع في مجال مغناطيسي نقوم بتطبيق قاعدة اليد اليسرى لفلمنج . وتكون قيمة واتجاه المجال المغناطيسي المتولد بالتيار المستمر ثابتة . في هذا البند نقوم بدراسة المجال المغناطيسي الدوار المتولد من التيار المتغير الجيبي .

٤ - ٦ - ١ المجال المغناطيسي الدوار المتولد من التيار المتغير ثلاثي الأوجه في الشكل ٤ - ٦٢ (أ) نفترض أن الملفات A, B, C التي لها عدد اللفات نفسه ولها الشكل نفسه تنطبق مراكزها والزوايا بين كل ملف والذي يليه هي $\{ \text{rad} \} 2\pi/3$. فعند مرور التيار المتغير ثلاثي الأوجه المتماثل في هذه الملفات تتولد المجالات المغناطيسية h_a, h_b, h_c التي تتناسب مع قيمة التيار. والاتجاهات الموجبة لكل من h_a, h_b, h_c هي اتجاهات h_a, h_b, h_c في الشكل ٤ - ٦٢ (أ). وقيمة هذه المجالات كما يلي :

$$\left. \begin{aligned} h_a &= k I_m \sin \omega t = H_m \sin \omega t \quad (\text{A/m}) \\ h_b &= k I_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) = H_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{A/m}) \\ h_c &= k I_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) = H_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (\text{A/m}) \end{aligned} \right\} (4-104)$$

حيث k هو ثابت التناسب طبقاً لشكل الملف .

يعبر الشكل ٤ - ٦٢ (ب) عن المعادلة (4 - 104) . ويمكن التعبير عن قيمة محصلة المجال المغناطيسي h عند اللحظة (2) مثلاً في الشكل ٤ - ٦٢ (ب) بالمعادلة التالية :

$$h = | \dot{h}_a + \dot{h}_b + \dot{h}_c | = H_m + \frac{H_m}{2} \cos \frac{\pi}{3} + \frac{H_m}{2} \cos \frac{\pi}{3} = \frac{3}{2} H_m \quad (4-105)$$

وحالة الشكل ٤ - ٦٢ (أ) هي أساس القياس لاتجاه التيار والمجال المغناطيسي. ومحصلة المجال المغناطيسي h هي مجموع المتجهات h_a, h_b, h_c .

وبطريقة مماثلة يوضح الشكل ٤ - ٦٢ (ج) قيمة واتجاه المجال المغناطيسي عند الأزمنة (1)، (2)،، (6) في الشكل ٤ - ٦٢ (ب) . ومن الشكل يتبين أن قيمة محصلة المجال المغناطيسي h في الملفات (المتولد نتيجة للتيار المتغير ثلاثي الأوجه) مقدار ثابت

$3 H_m / 2$ أما اتجاه المحصلة h فيدور في الاتجاه نفسه مثل تسلسل الأوجه مع الزمن ويتم دورة واحدة من (1) إلى (7) . أي إن مرور التيار المتغير ثلاثي الأوجه الذي تردده f [Hz] في الملفات يجعل محصلة المجال المغناطيسي تدور (f) من المرات كل ثانية واحدة . وسرعة دوران محصلة المجال المغناطيسي $n_s \{ \text{rpm} \}$ (عدد اللفات في الدقيقة الواحدة) تسمى السرعة المتزامنة وتحسب من المعادلة :

$$n_s = 60 f \quad (\text{rpm}) \quad (4 - 106)$$

ويعدّ دوران المجال المغناطيسي مع الزمن جزءاً مهماً لعمل المحرك .

$3 H_m / 2$ أما اتجاه المحصلة h فيدور في الاتجاه نفسه مثل تسلسل الأوجه مع الزمن ويتم دورة واحدة من (1) إلى (7) . أي إن مرور التيار المتغير ثلاثي الأوجه الذي تردده f [Hz] في الملفات يجعل محصلة المجال المغناطيسي تدور (f) من المرات كل ثانية واحدة . وسرعة دوران محصلة المجال المغناطيسي $n_s \{rpm\}$ (عدد اللفات في الدقيقة الواحدة) تسمى السرعة المتزامنة وتحسب من المعادلة :

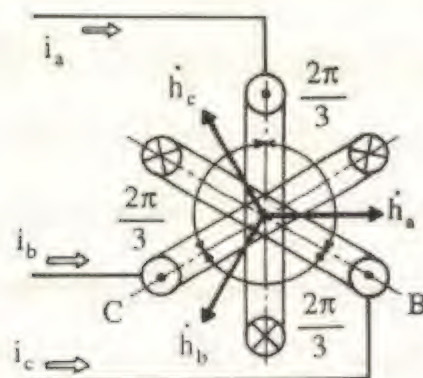
$$n_s = 60 f \quad (rpm)$$

$$(4 - 106)$$

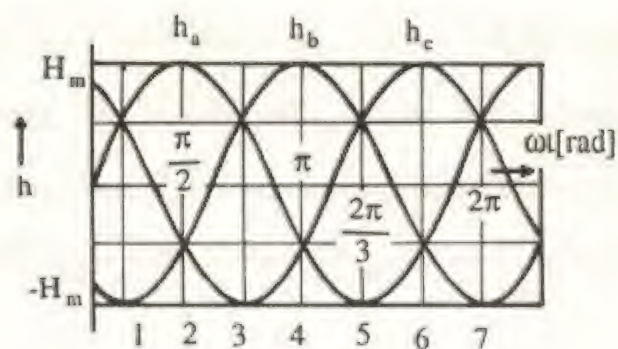
ويعدّ دوران المجال المغناطيسي مع الزمن جزءاً مهماً لعمل المحرك .

الحمد لله تعالى الذي تتم بنعمه الصالحات
لقد وفقت بتصوير النسخة اسكنر بصورة جديدة
وطباعة ممتازة

نسألكم الدعاء بظهر الغيب لي ولوالدي
اخوكم في الله أبو عبد الله عبد المهيمن فوزي



(I)



(B)

كل لحظة	المجال المغناطيسي في الملف A	المجال المغناطيسي في الملف B	المجال المغناطيسي في الملف C	متجه المحصلة \vec{h}	قيمة المحصلة	اتجاه المحصلة
1 7	$h_a = \frac{1}{2} H_m$ 	$h_b = H_m$ 	$h_c = \frac{1}{2} H_m$ 		$h = \vec{h}_c + \vec{h}_a + \vec{h}_b $ $= \frac{1}{2} H_m + H_m$ $= \frac{3}{2} H_m$	
2					$h = \vec{h}_c + \vec{h}_a + \vec{h}_b $ $= \frac{1}{2} H_m + H_m$ $= \frac{3}{2} H_m$	
3					$h = \vec{h}_c + \vec{h}_a + \vec{h}_b $ $= \frac{1}{2} H_m + H_m$ $= \frac{3}{2} H_m$	
4					$h = \vec{h}_c + \vec{h}_a + \vec{h}_b $ $= \frac{1}{2} H_m + H_m$ $= \frac{3}{2} H_m$	
5					$h = \vec{h}_c + \vec{h}_a + \vec{h}_b $ $= \frac{1}{2} H_m + H_m$ $= \frac{3}{2} H_m$	
6					$h = \vec{h}_c + \vec{h}_a + \vec{h}_b $ $= \frac{1}{2} H_m + H_m$ $= \frac{3}{2} H_m$	

(ج)

الشكل ٤ - ٦٢ المجال المغناطيسي الدوار المتولد عند مرور التيار المتغير ثلاثي الأوجه

٤ - ٦ - ٢ محرك الحث Induction motor

لنفترض أننا وضعنا جزءاً دواراً (rotor) قادراً على الدوران الحر في مجال مغناطيسي دوار متولد من تيار متغير ثلاثي الأوجه أو ثنائي الأوجه . فإنه طبقاً لمبدأ قرص أراجو* يسري تيار تأثيري في الموصل على سطح الجزء الدوار يجعل الجزء الدوار يدور نتيجة للقوة الكهرومغناطيسية التي تؤثر على الموصل في المجال المغناطيسي الدوار . ويكون اتجاه دوران الجزء الدوار هو اتجاه المجال المغناطيسي الدوار نفسه. ويسمى هذا النوع من المحركات محرك الحث .

١- سرعة الدوران والسرعة المتزامنة $n_s \{ \text{rpm} \}$ Synchronous speed

إذا افترضنا أن تردد مصدر القدرة هو $f \{ \text{Hz} \}$ وعدد الأقطاب المغناطيسية (مجموع أقطاب N وأقطاب S يكون عدداً زوجياً) هو P فإننا نحصل على العلاقة الآتية :

$$n_s = \frac{120 f}{P} \quad (\text{rpm}) \quad (4 - 107)$$

ونسبة الفرق بين السرعة المتزامنة (n_s) وبين سرعة دوران الجزء الدوار (n) إلى السرعة المتزامنة (n_s) تسمى الانزلاق (slip) وتحسب من المعادلة التالية :

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \quad (\%) \quad (4 - 108)$$

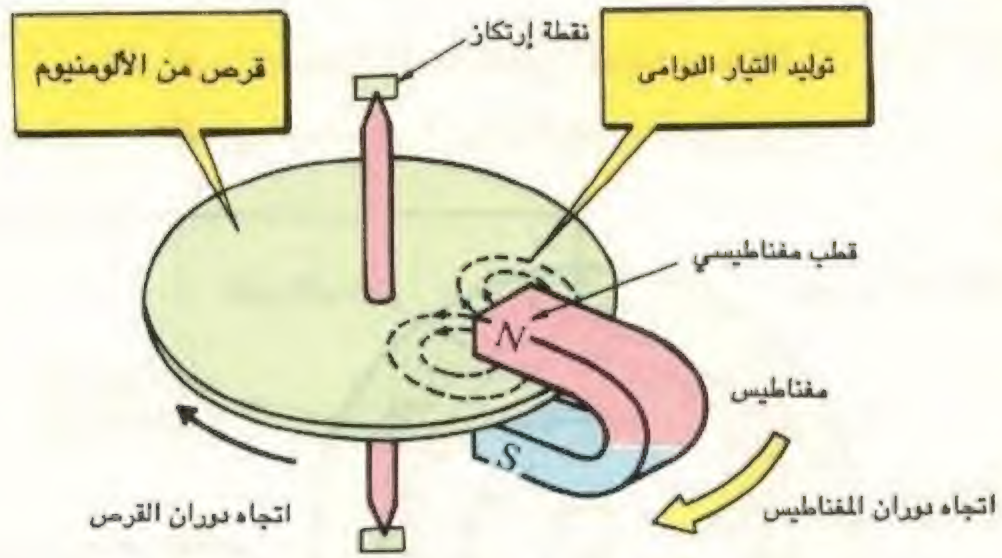
الانزلاق S هو نسبة تأخر الجزء الدوار إلى السرعة المتزامنة ويحسب كنسبة مئوية . وتتراوح قيمة الانزلاق S بين صفر ، 100 في المئة . وفي حالة سكون الجزء الدوار تكون $S = 100\%$ وفي حالة الدوران بدون حمل تكون $S = 0\%$ تقريباً . وعند تشغيل الحمل الكامل فإن $S = 4 - 10\%$.

سؤال ٣٢

يقوم مصدر قدرة تردده 50 هرتز بتغذية محرك حث له أربعة أطراف . احسب سرعة دوران الجزء الدوار في المحرك إذا كان الانزلاق 4% .

* نبذة عن قرص أراجو Arago's disk

يبين الشكل ٤ - ٦٣ أن قرص أراجو يتكون من قرص ألومنيوم (مثبت بين نقطتي إرتكاز له قدرة على الحركة بحرية) وقطب مغناطيسي (مثلاً مغناطيس على شكل حرف U يحيط بالقرص كالساندوتش دون أن يلامسه ويتحرك أيضاً بحرية) . وعند تحرك هذا المغناطيس في اتجاه السهم المبين بالشكل مع حافة القرص يتولد تيار تأثيرى في اتجاه مطابق لقاعدة اليد اليمنى لفلمنج . وتبين الأسهم ذات الخط المتقطع إتجاه التيار التأثيرى . وتتولد قوة كهرومغناطيسية نتيجة للتيار التأثيرى والمجال المغناطيسى على الأقطاب المغناطيسية طبقاً لقاعدة اليد اليسرى لفلمنج فتجعل القرص يدور في إتجاه حركة القطب المغناطيسي . وتكون سرعة دوران القرص أقل قليلاً من سرعة دوران الأقطاب المغناطيسية . وإذا عكسنا اتجاه حركة الأقطاب المغناطيسية يدور القرص في الاتجاه العكسي . وظاهرة انجذاب القرص للمغناطيس سببها القوة الكهرومغناطيسية التى تؤثر على التيار التأثيرى في القرص الموصل الموضوع في المجال المغناطيسي .



الشكل ٤ - ٦٣ قرص أراجو .

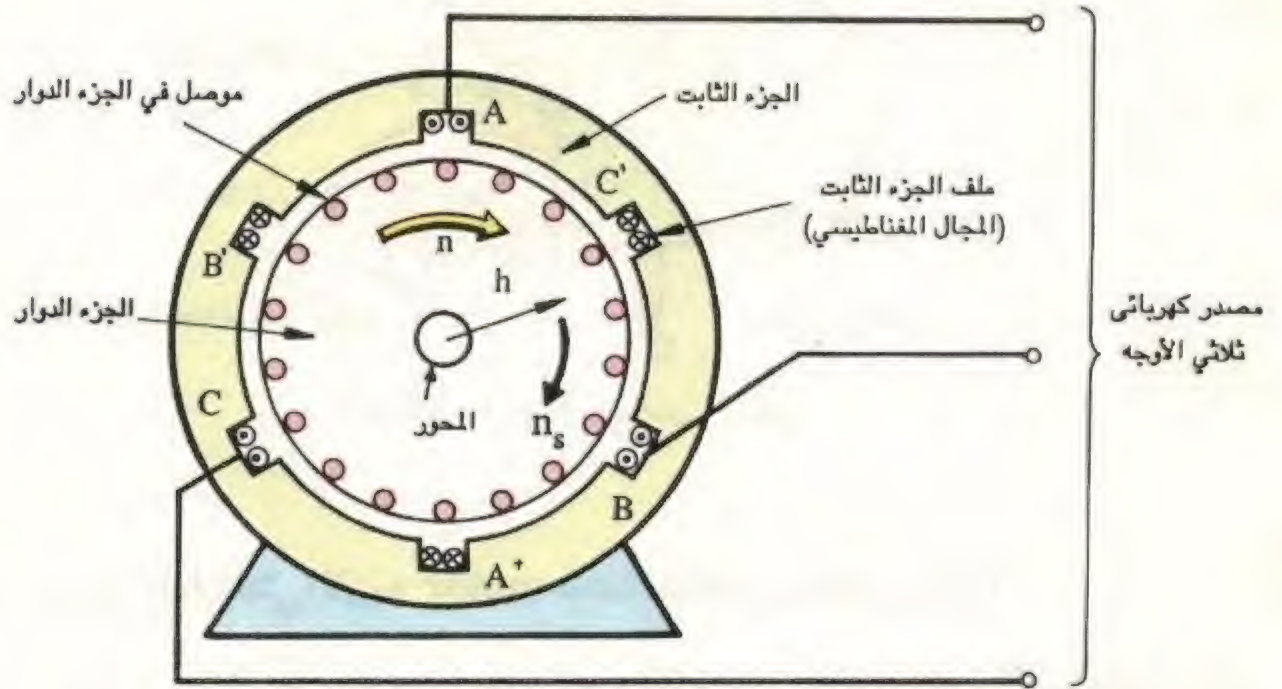
ب - محرك الحث ثلاثي الأوجه Three phase induction motor

يبين الشكل ٤ - ٦٤ أنه عند تغذية ملف الجزء الثابت من المحرك ثلاثي الأوجه بجهد متغير ثلاثي الأوجه يتولد مجال مغناطيسي دوار في ملف الجزء الدوار . ويثبت الجزء الدوار عن طريق نقطتي إرتكاز، وتؤثر عليه قوة كهرومغناطيسية تجعله يستمر في الدوران في اتجاه دوران المجال المغناطيسي الدوار . ومحرك الحث الذي يعمل بهذه الطريقة يسمى محرك الحث ثلاثي الأوجه .

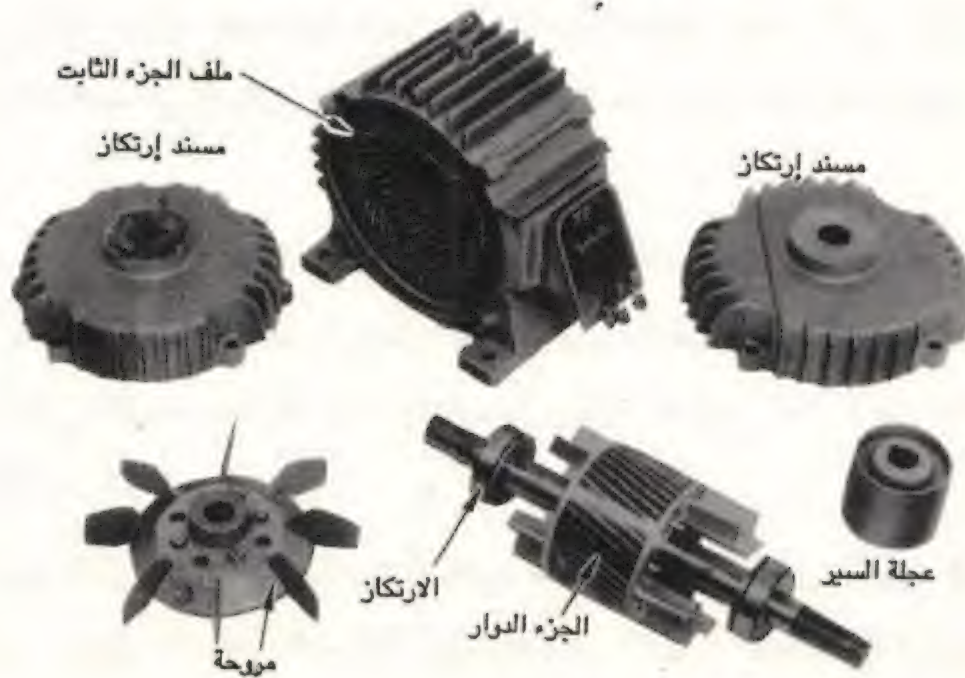
ويمكن تقسيم محركات الحث ثلاثية الأوجه إلى محرك حث القفص السنجابي، ومحرك حث الجزء الدوار الملفوف طبقاً لترتيب موصل الجزء الدوار ، وفي الجزء الدوار الملفوف تتصل أطراف الملف ثلاثي الأوجه بمقاومة البدء الخارجية ودائرة تعويض البدء خلال ثلاثة مجموعات من الفرش وحلقات الانزلاق .

ومحرك الحث ثلاثي الأوجه يتسم بأنه صغير، سهل التركيب، طويل العمر، قليل الاهتزاز، قليل الضوضاء ، سهل التشغيل والصيانة، ويستخدم في الأدوات الميكانيكية كماكينات الخراطة والتثقيب .

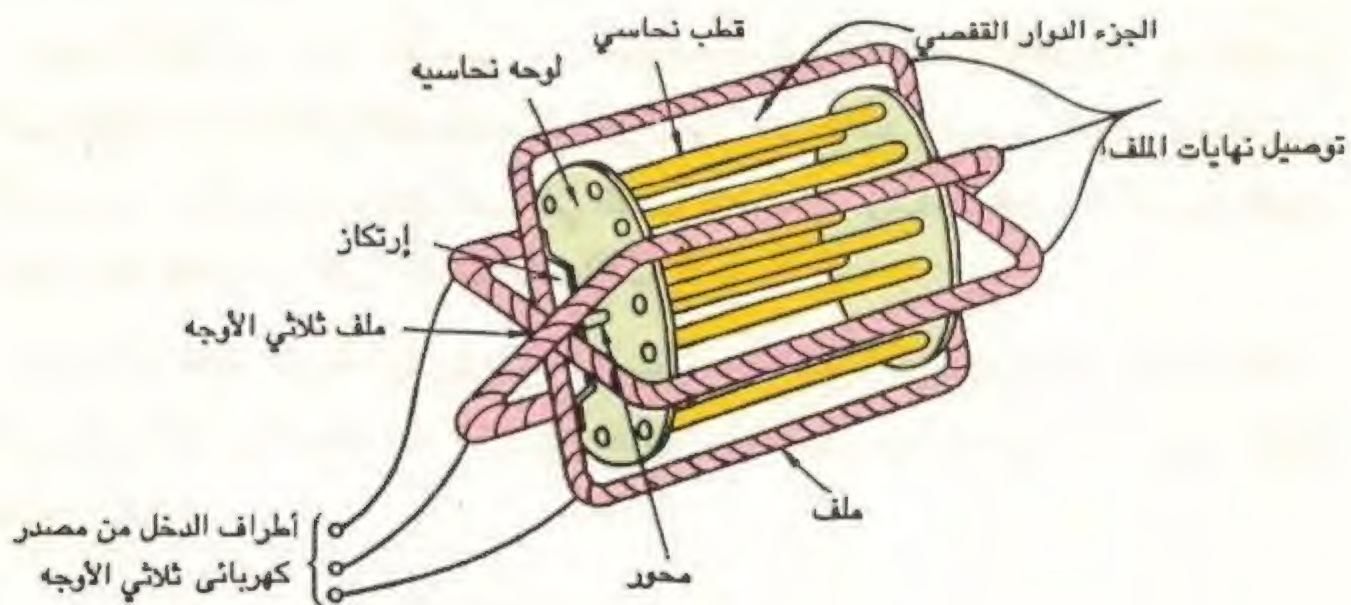
ويبين الشكل ٤ - ٦٥ أجزاء محرك الحث ثلاثي الأوجه أما الشكل ٤ - ٦٦ فيبين نموذجاً لتركيب محرك حث القفص السنجابي (أساساً الجزء الدوار) .



الشكل ٤ - ٦٤ محرك الحث ثلاثي الأوجه



الشكل ٤ - ٦٥ تركيب أجزاء محرك الحث ثلاثي الأوجه .



الشكل ٤ - ٦٦ الجزء الدوار لمحرك القفص السنجابي

وملف مجال محرك الحث ثلاثي الأوجه .

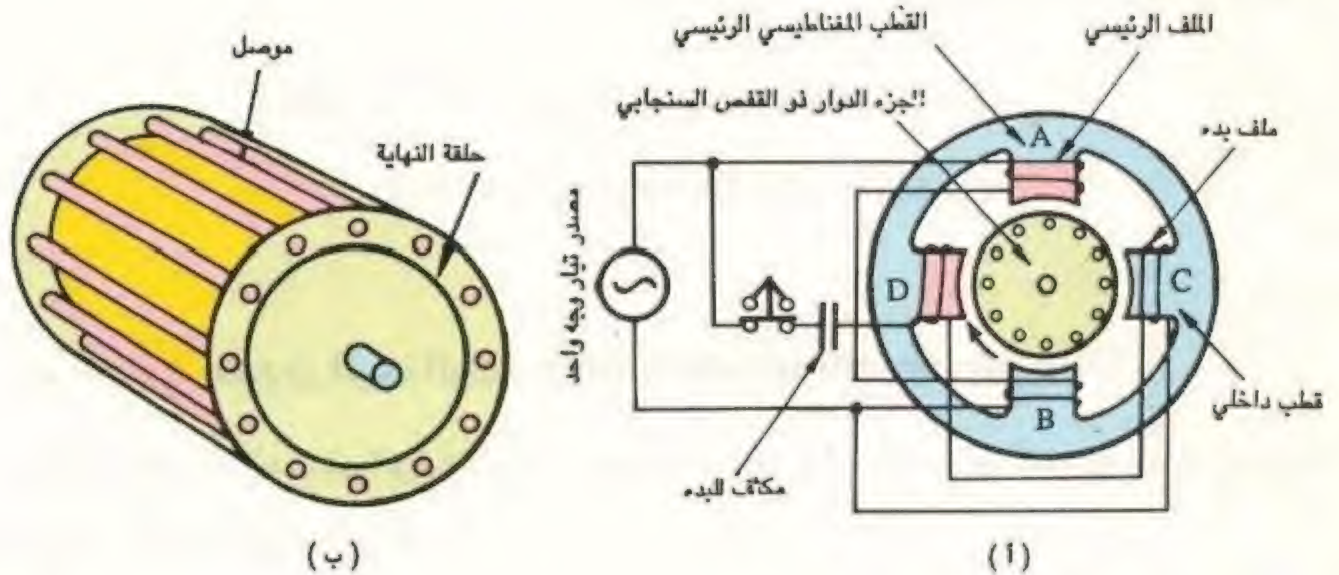
ح - محرك الحث ذو الوجه الواحد One phase induction motor

يتكون محرك الحث ذو الوجه الواحد من جزء ثابت (به ملف مجال وجه واحد) وجزء متحرك (القفص السنجابي) .

عند تغذية ملف المجال في الجزء الثابت بجهد متغير له وجه واحد لايتولد مجال مغناطيسي دوار ، ولايتولد عزم ، ولاتحدث حركة للجزء الدوار . أما عند إدارة الجزء الدوار بأية طريقة ينشأ عزم على الجزء الدوار ويساعد المجال المتغير* المتولد من التيار ذي الوجه الواحد على استمرار دوران الجزء الدوار . ويمكن تقسيم محرك الحث ذي الوجه الواحد طبقاً لطريقة توليد العزم إلى ثلاثة أنواع الأول هو نوع البدء باستخدام الوجه المنفصل و الثاني نوع البدء باستخدام المكثف والنوع الثالث هو ملف الظل . ومحرك الوجه الواحد يتسم بأنه محرك صغير يحتاج إلى أقل من 750 وات، ويستخدم في الصناعة والزراعة والأجهزة الإلكترونية المنزلية .

يبين الشكل ٤ - ٦٧ (أ) مبدأ عمل محرك حث الوجه الواحد بمكثف بدء . ويتم تقسيم الوجه الواحد باستخدام مكثف للحصول على وجهين لتغذية الملف الرئيسي للقطب المغناطيسي الأساسي، وكذلك لتغذية ملف البدء في القطب الإضافي . ويتحرك قطب N للمجال الدوار المتولد طبقاً للتسلسل الآتي C ثم A ثم D ثم B .

ويتم عمل قصر في الدائرة بين نهاية الموصل وحلقة النهاية في الجزء الدوار لمحرك القفص السنجابي كما في الشكل ٤ - ٦٧ (ب) لتوليد تيار تأثيري وإدارته في اتجاه دوران المجال بقيمة انزلاق S .



الشكل ٤ - ٦٧ محرك حث وجه واحد ذو مكثف بدء .

* المجال المتغير له شكل موجي جيبي وتتغير شدته .

إذا كانت سرعة الدوران ثابتة فإن مفتاح القوة الطاردة المركزية يكون في وضع التوصيل أو عدم التوصيل لفصل ملف البدء وترك المجال المتغير للملف الرئيسي . ويدور الجزء الدوار بالقصور الذاتي ، ويستمر حدوث التيار التأثيري مما ينتج عنه استمرار الدوران وهذا النوع من المحركات له تيار بدء صغير وعزم بدء كبير .

تمارين

١ - تيار متغير جيبي تردده 50 هرتز وقيمته اللحظية هي :

$$i = 10\sqrt{2} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{4} \right) \quad [A]$$

احسب المتغيرات التالية :

(١) زمن الدورة $T[s]$ ، (٢) القيمة اللحظية $i [A]$ عند $t = 5 [ms]$

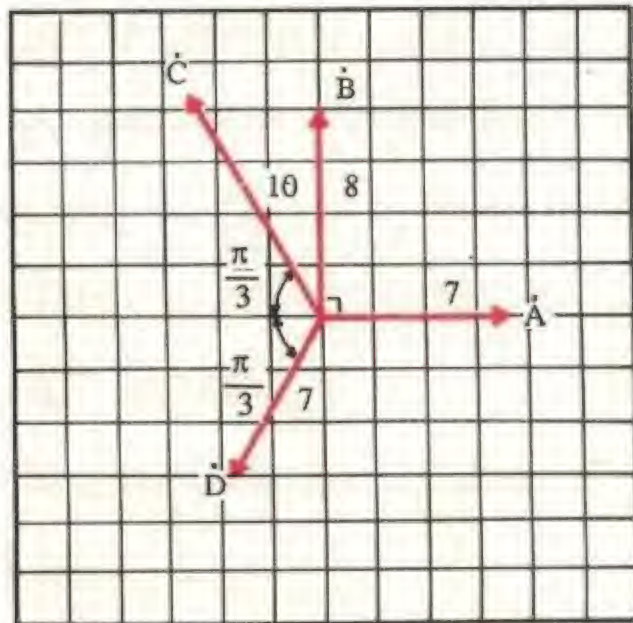
(٣) التردد الدائري $\omega [rad/s]$

(٤) زاوية الوجه الابتدائية $\phi [rad]$

(٥) القيمة الفعالة $I [A]$

(٦) القيمة المتوسطة $I_a [A]$

٢ - المطلوب تمثيل الأعداد المركبة \dot{A} , \dot{B} , \dot{C} , \dot{D} المبينة في الشكل ٤ - ٦٨ باستخدام الإحداثيات المتعامدة والإحداثيات القطبية . أوجد بالرسم المجموع $\dot{F} = \dot{A} + \dot{D}$ والفرق $\dot{G} = \dot{A} - \dot{D}$ واكتبها بالطريقة نفسها .



الشكل ٤ - ٦٨ رسم المتجهات

٣ - احسب الأعداد المركبة الآتية :

$$(1) (6 + j9) + (3 - j6) \quad (2) (-4 + j8) - (-4 - j6) \quad (3) (3 + j5) \times (6 + j2)$$

$$(4) (8 + j6) \times (8 - j6) \quad (5) (2 + j2\sqrt{3})^2 \quad (6) \frac{1}{3 + j4}$$

$$(7) \frac{6 + j4}{-j2} \quad (8) 50 \angle j\frac{\pi}{3} \times 20 \angle j\frac{\pi}{6} \quad (9) 6 \angle j\frac{\pi}{2} \times 5 \angle j\left(-\frac{\pi}{6}\right)$$

$$(10) \frac{25 \angle j0}{5 \angle j\pi/6}$$

٤ - يقوم جهد متغير جيبي تردده 50 هرتز بقيمته $\dot{V} = 100 \angle j0 [V]$ بتغذية دائرة توالى مكونة من مقاومة $R = 8 [\Omega]$ وملف $L = 19.1 [mH]$ احسب مايلي :

$$(١) \text{ المفاعلة } X_L \quad (٢) \text{ الممانعات } Z, \dot{Z}$$

$$(٣) \text{ التيارات } I, \dot{I} \quad (٤) \text{ زاوية الممانعة } \phi$$

٥ - يقوم جهد متغير قيمته $\dot{V} = 100 [V]$ بتغذية حمل فيمر التيار $\dot{I} = 3 - j4 [A]$ احسب ممانعة الحمل، ومقاومة الحمل، ومفاعلة الحمل .

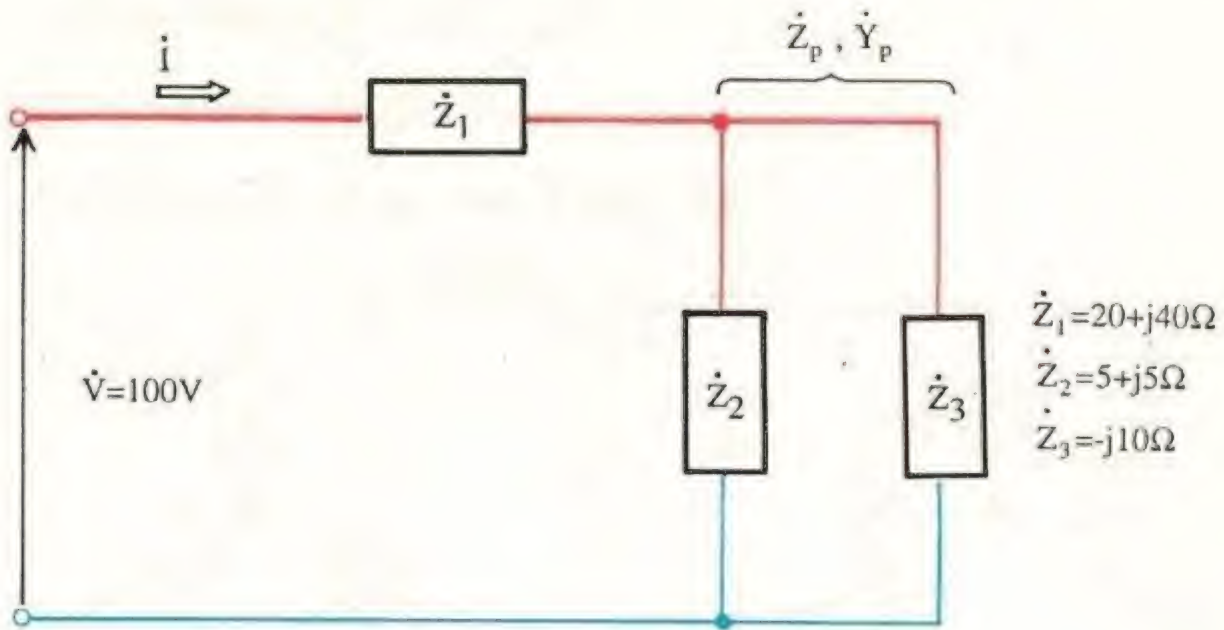
٦ - احسب مايلي لدائرة توالى - توازي المبينة في الشكل ٤ - ٦٩

$$(١) \text{ السماحية الكلية } \dot{Y}_p \text{ لجزء التوازي .}$$

$$(٢) \text{ الممانعة الكلية } \dot{Z}_p \text{ لجزء التوازي}$$

$$(٣) \text{ الممانعة الكلية } \dot{Z} \text{ وزاوية الممانعة } \phi \text{ للدائرة بأكملها .}$$

$$(٤) \text{ التيار الكلى } \dot{I} \text{ المار في الدائرة .}$$



الشكل ٤ - ٦٩ دائرة توالى - توازى .

٧ - فى الدائرة الخاصة بالسؤال ٤ . احسب معامل القدرة $\cos \phi$ والقدرة الفعالة P والقدرة غير الفعالة Q والقدرة الظاهرة S .

٨ - يقوم جهد متغير ثلاثى الأوجه متمائل ذو قوة دافعة كهربائية 115 فولت للوجه الواحد بتغذية حمل ثلاثى الأوجه متوازن قيمة حمل كل وجه 50 أوم بطريقة توصيل Y-Y .
احسب تيار الخط I_l وجهد الخط V_l .

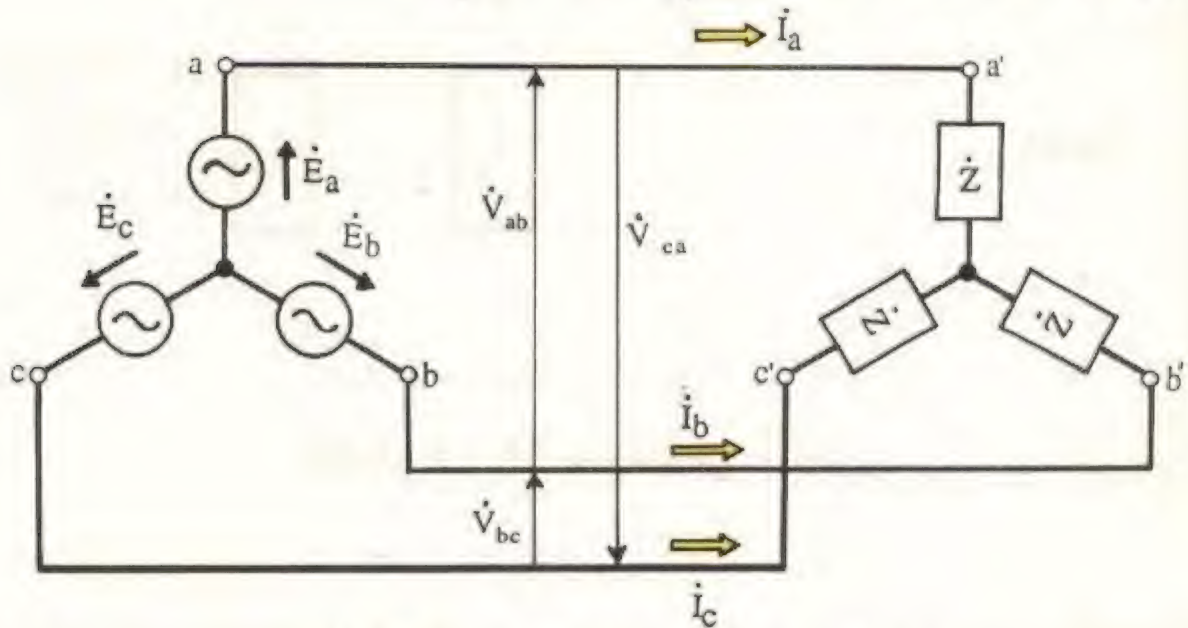
٩ - دائرة توصيل دلتا- دلتا القوة الدافعة الكهربائية لكل وجه فى مصدر القدرة 210 فولت تستخدم حمل متوازن قيمة الحمل فى كل وجه 30 أوم . احسب تيار الوجه وتيار الخط الذى يسرى إلى الحمل .

١٠ - يبين الشكل ٤ - ٧٠ دائرة توصيل Y-Y بها مصدر قدرة ثلاثى الأوجه متمائل وحمل متوازن، قيمة الحمل فى كل وجه $Z = 8 + j6 \{\Omega\}$ وقيمة القوة الدافعة الكهربائية فى كل وجه 200 فولت . احسب مايلى :

(١) جهود الخط \dot{V}_{ca} , \dot{V}_{bc} , \dot{V}_{ab}

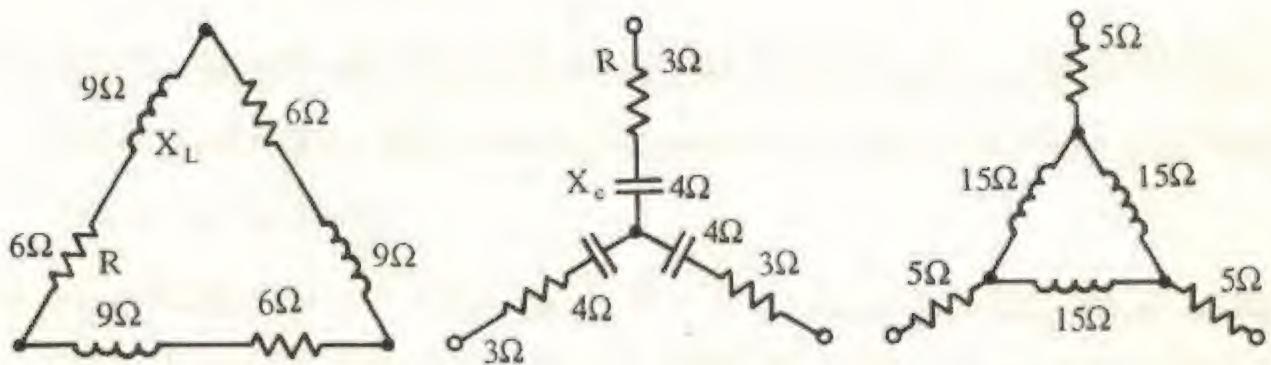
(٢) تيارات الخط \dot{I}_c , \dot{I}_b , \dot{I}_a

(٣) فرق الوجه ϕ بين جهد الخط V_r وتيار الخط I_r .



الشكل ٤ - ٧٠ دائرة توصيل Y - Y .

١١ - المطلوب تغيير توصيل الحمل في الشكل ٤ - ٧١ إلى توصيلة Y وإلى توصيلة دلتا .



الشكل ٤ - ٧١ تغيير توصيلة الحمل إلى Y أو إلى دلتا .

١٢ - يبين الشكل ٤ - ٧٢ مصدر قدرة ثلاثي الأوجه متماثل له توصيلة دلتا يغذى حمل ثلاثي الأوجه متوازن له توصيلة Y . جهد الوجه في مصدر القدرة قيمته 100 فولت، وتيار الخط قيمته $5\sqrt{3} \angle (-\pi/3)$ [A] . أجب عن الأسئلة الآتية :

(١) احسب الجهد الموجود على أوجه الحمل \dot{V}_a , \dot{V}_b , \dot{V}_c باستخدام الدالة الأسية بالقياس إلى \dot{E}_a .

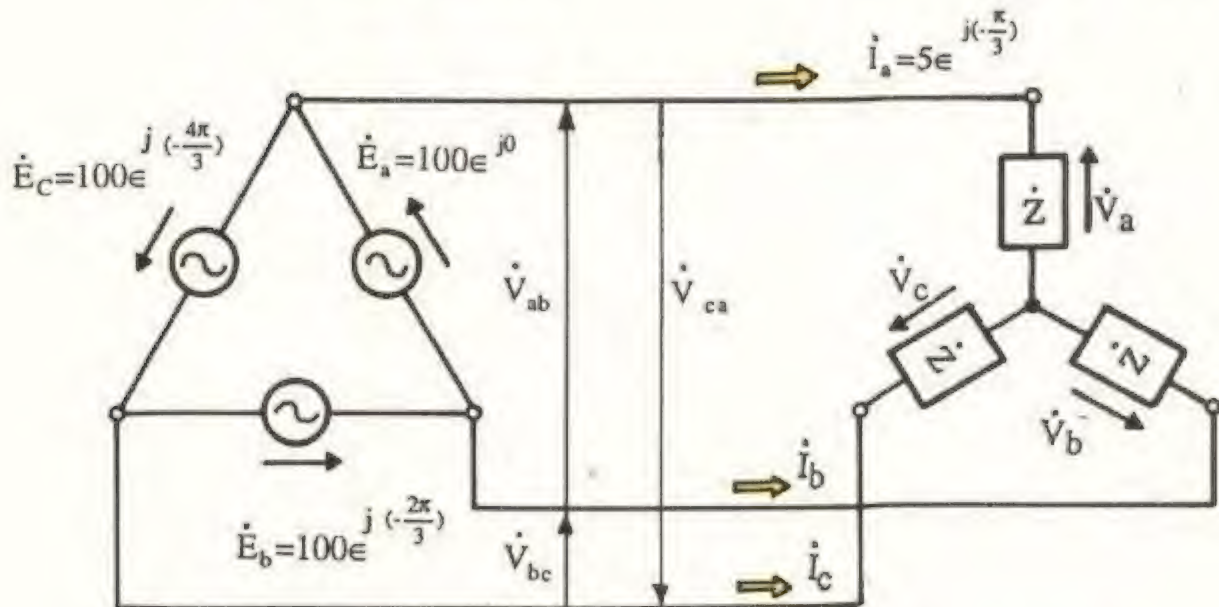
(٢) احسب ممانعة الحمل Z باستخدام الاحداثيات المتعامدة والدالة الأسية

(٣) احسب فرق الوجه بين جهد الخط وتيار الخط .

١٣ - احسب المتغيرات الآتية في الدائرة الخاصة بالسؤال السابق :

(١) معامل قدرة الحمل . (٢) القدرة الفعالة P .

(٣) القدرة غير الفعالة Q . (٤) القدرة الظاهرة S .



الشكل ٤ - ٧٢ مصدر قدرة توصيل - دلتا وحمل توصيل - Y .

١٤ - كيف يمكن إدارة كل من محرك الحث ثلاثي الأوجه، ومحرك الحث وجه واحد في الاتجاه العكسي؟ (اقتراح : فكر في طريقة عكس اتجاه دوران المجال الدوار) .

الفصل الخامس

الأشكال الموجية المختلفة

Various waveforms

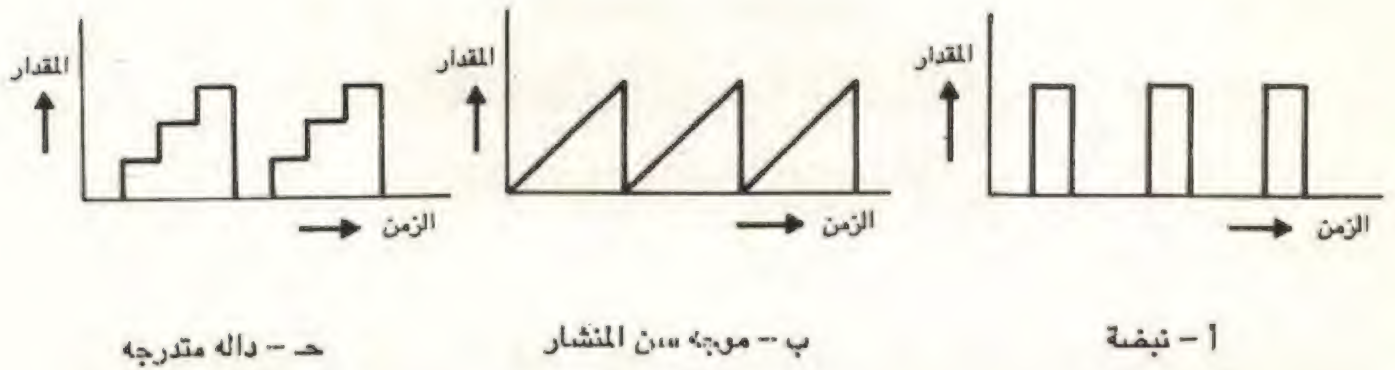
إن التيار المتغير أو المتردد (AC) الذى سبقت دراسته في الفصل الرابع هو تغيير جيبي للتيار المتردد مع الزمن . وعلى العكس من ذاك فإن الموجة غير الجيبية للتيار المتردد هي أي نوع آخر من الموجات المختلفة عن الموجة الجيبية .

من أمثلة الموجة غير الجيبية للتيار المتردد موجه التيار الموجودة في ملف ذى قلب حديدى يظهر الشكل المركب والمدة الزمنية الثابتة والنبضات ويستخدم هذا النوع من الموجات في الهندسة الإلكترونية مثل أجهزة الحاسب والتلفزيون .

ويعطي فصل ووصل مصدر القدرة في دائرة ما ، موجات عابرة من الجهد والتيار عند المخرج . وتستخدم أنواع أشكال الموجة هذه أيضاً في الهندسة الكهربائية والإلكترونية . وسوف نتناول في هذا الفصل الموجة غير الجيبية للتيار المتردد ، وظاهرة النبضات، والظاهرة العابرة .

٥ - ١ موجة التيار المتردد غير الجيبية Non-Sinusoidal

إن موجة التيار المتردد غير الجيبية أو موجة التيار المتردد غير المنتظمة هي موجه تيار متردد من نوع مختلف عن الموجات الجيبية .



شكل ٥ - ١ أمثلة للموجات غير الجيبية للتيار المتردد

٥ - ١ - ١ مركبات موجة التيار المتغير (AC) غير الجيبية

إن تجميع موجات جيبية مختلفة التردد والمدي ينتج موجة غير جيبية كما هو موضح بالمثل في الشكل ٥ - ٢ .

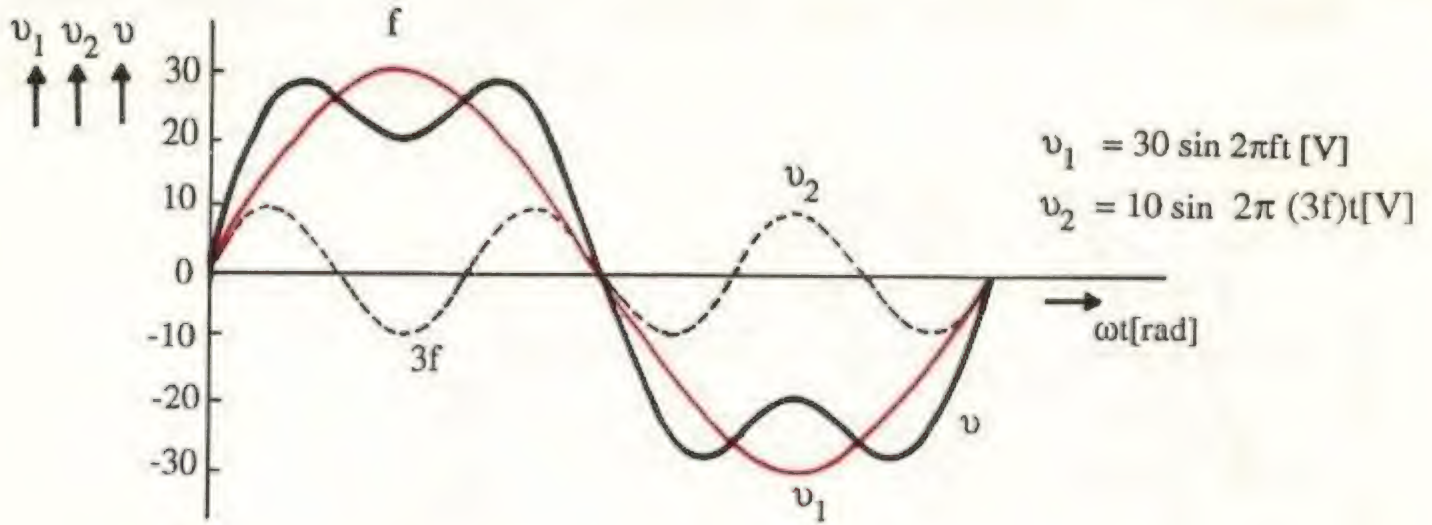
وهكذا فإن تجميع موجة جهد جيبية ممثلة بالمعادلة :

$$v_1 (= 30 \sin 2 \pi f t) \quad [V] \quad (1)$$

والتي ترددها f (Hz) مع موجة جيبية أخرى ممثلة بالمعادلة :

$$v_2 (= 10 \sin 2 \pi (3 f) t) \quad [V] \quad (2)$$

والتي ترددها $3 f$ [Hz] ينتج موجة جهد V [V] غير جيبية . وفي هذه الحالة فإن v_1 , v_2 يمثلان عناصر موجة الجهد V .



الشكل ٥ - ٢ مركبات موجة غير جيبية

٥ - ١ - ٢ توليد موجة التيار المتغير (AC) غير الجيبية

إن موجة التيار غير الجيبية تحدث في حالات عديدة ، وهنا سوف نتناول تحليل الجهد والتيار في ملف له قلب حديدي .

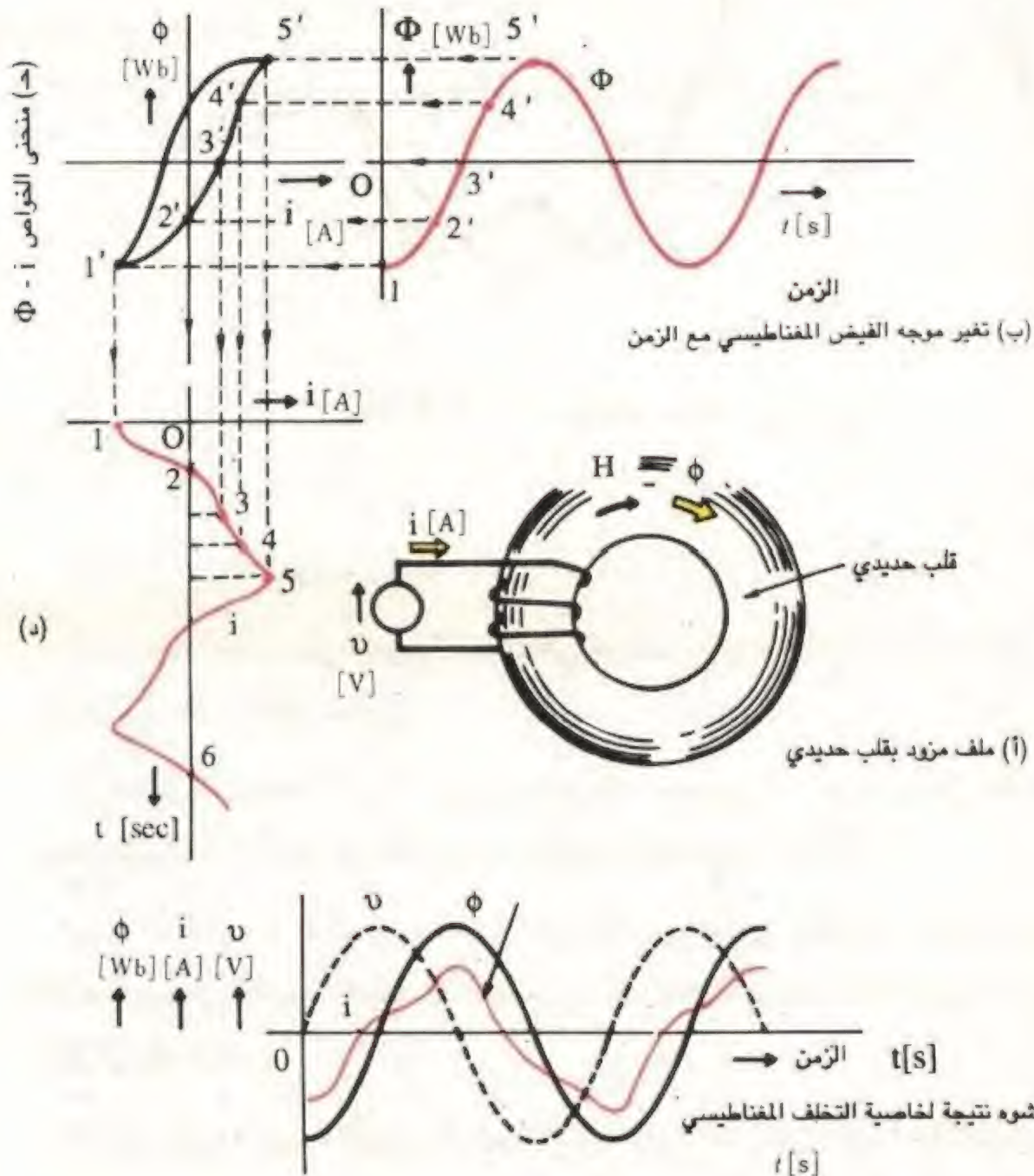
إن تطبيق الجهد $V [V]$ في ملف ذي قلب حديدي كما هو مبين في الشكل ٥ - ٣ (أ) يجعل التيار $i [A]$ يمر في الملف ويولد الفيض المغناطيسي $\phi [Wb]$.

ويبين الشكل ٥ - ٣ (ب) خاصية العلاقة بين التيار والفيض المغناطيسي ϕ . وهذه الخاصية تسمى خاصية التخلف المغناطيسي ، لأن علاقة التخلف المغناطيسي بين ϕ - i تشبه شكل موجة التيار .

كما أن تطبيق موجة الجهد الجيبى المتردد إلى ملف ينشئ فيضاً مغناطيسياً $\phi [Wb]$ ذا موجة جيبية كما هو موضح بالشكل ٥ - ٣ (ب) .

وتصبح موجة التيار $i [A]$ الناتجة من تسليط الجهد V على الملف واستخدام علاقة

التخلف المغناطيسي $\phi - i$ في الحالة الموضحة في الشكل ٣-٥ (د). وبيّن
الشكل ٣-٥ (هـ) الموجات V, i, ϕ .



الشكل ٣ - ٥ الجهد والتيار ملف له قلب حديدي

سؤال ١

يعطي الملف ذو المحور الهوائى علاقة خطية بين H, ϕ ولا توجد خاصية التخلف المغناطيسي . فهل يحدث تشوه أو انحراف في موجة التيار ؟

سؤال ٢

فى الشكل ٥ - ٣ (هـ) حدد النقاط ϕ, i, V المقابلة للزمن المحدد عند النقطة 6 فى الشكل ٥ - ٣ (د) .

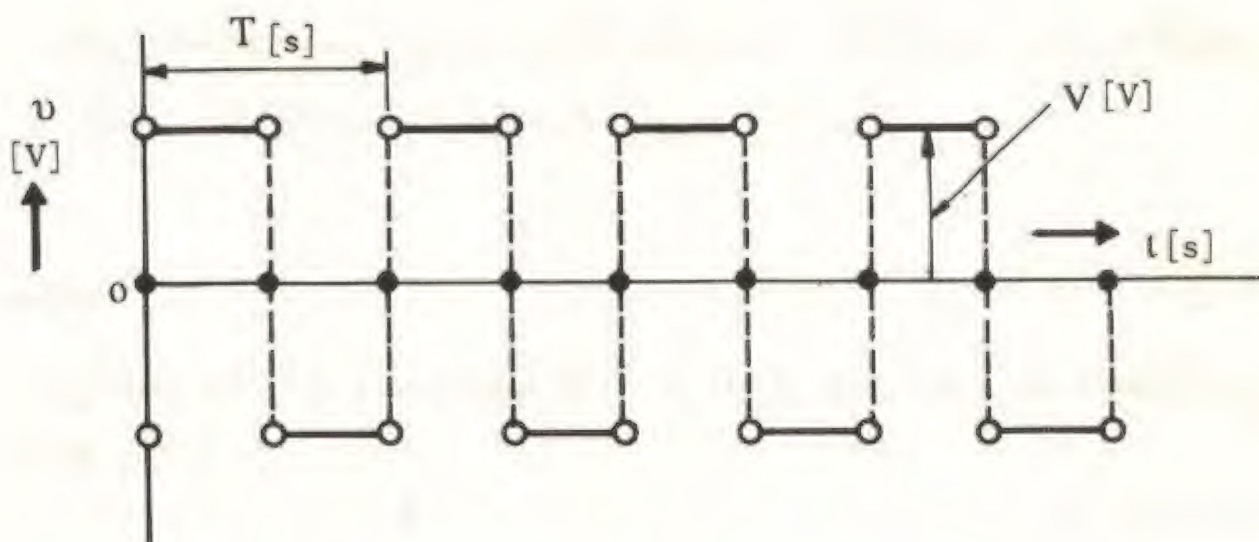
٥ - ١ - ٣ توافقيات التيار المتغير ذى الموجة غير الجيبية

إن شكل الموجة الموضح بالشكل ٥ - ٤ يسمى الموجة المربعة . وتتكرر الموجة المربعة على مدد زمنية ثابتة T وتتمثل نظرياً بالمعادلة الآتية :

$$v = \frac{4}{\pi} V (\sin \omega t + 1/3 \sin 3 \omega t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega t + 1/7 \sin 7 \omega t +) \quad (5 - 1)$$

ففى هذه المعادلة يمثل الحد $\frac{4}{\pi} V \sin \omega t$ الموجة التوافقية الأساسية كما يمثل الحد $\frac{4}{3\pi} V \sin 3 \omega t$ ثلاثة أمثال تردد الموجة التوافقية الأساسية ويعدّ التوافق الثالث . أما الحد $\frac{4}{5\pi} V \sin 5 \omega t$ فيمثل خمسة أمثال تردد الموجة التوافقية الأساسية، ويعدّ التوافق الخامس .

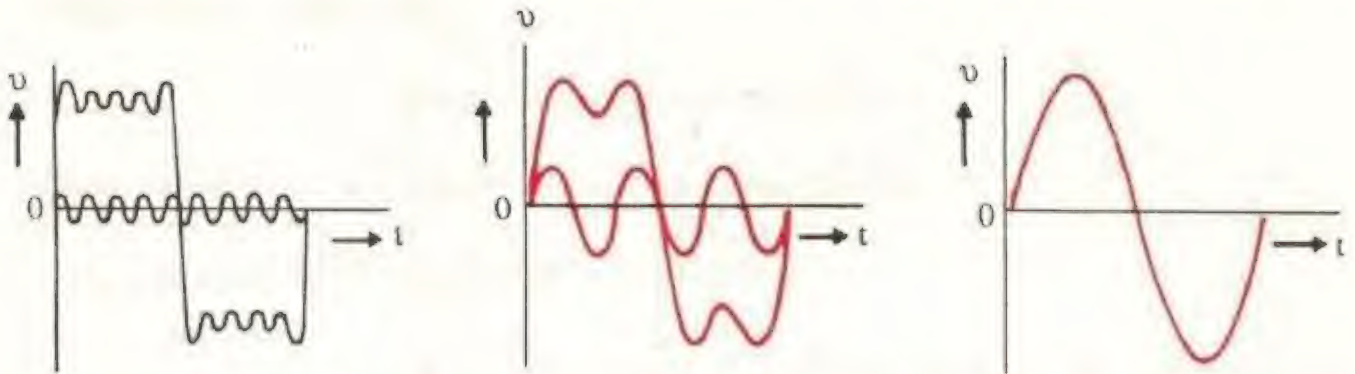
وهكذا فإن الموجات عالية التردد بالنسبة للتوافق الأساسي تسمى بالتوافقيات العليا .



الشكل ٥ - ٤ الموجة المربعة Square wave

الشكل ٥ - ٥ (أ) يمثل موجة التوافق الأساسي ، كما أن الشكل ٥ - ٥ (ب) يتكون من موجة التوافق الأساسي وموجة التوافق الثالث .

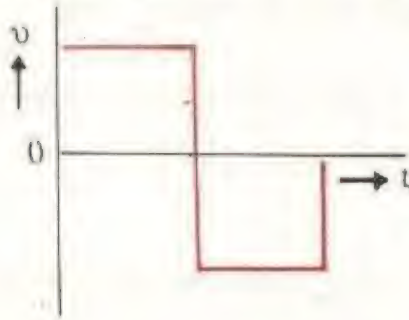
كما نلاحظ أيضاً أن الشكل ٥ - ٥ (ج) يتكون من موجات توافقية حتى التوافق التاسع . والشكل ٥ - ٥ (د) يمثل جميع عدد من الموجات حتى التوافق التاسع عشر ، وأخيراً فإن الشكل ٥ - ٥ (هـ) يتكون من جميع موجات حتى التوافق التاسع والتسعين ، ويتضح من هذه الأشكال أن جميع التوافقات عالية التردد تجعل الشكل الناتج من مجموعها يقترب من شكل الموجة المربعة .



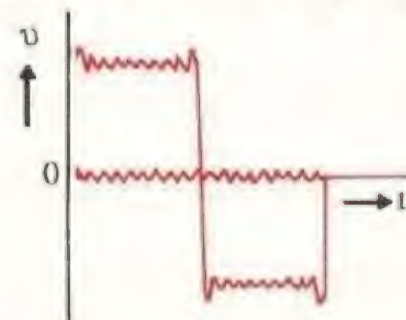
أ - التوافق الأساسي فقط

ب - التوافق الثالث والموجه المجمع

ج - التوافق التاسع والموجه المجمع



د - التوافق التاسع والتسعون والموجه المجمع



هـ - التوافق التاسع عشر والموجه المجمع

الشكل ٥ - ٥ الموجة المربعة وتوافقياتها .

٥ - ١ - ٤ القيمة الفعالة ومعامل التشويه Distortion factor

للتيار المتغير ذي الموجة غير الجيبية

١ - القيمة الفعالة Effective value

إن القيمة الفعالة تستخدم للتعبير عن سعة الموجات الجيبية وغير الجيبية . وسوف يتم تحليل القيمة الفعالة لموجة الجهد الجيبية وغير الجيبية .

$$v = \sqrt{2} V_1 \sin \omega t + \sqrt{2} V_2 \sin 2 \omega t \quad [V] \quad (5-2)$$

وتعرف القيمة الفعالة بالآتي :

$$\sqrt{\text{القيمة المتوسطة لمربع القيمة اللحظية}} = \text{القيمة الفعالة}$$

والآن سوف نستنتج v^2 من المعادلة (5 - 2) :

$$\begin{aligned} v^2 &= (\sqrt{2} V_1 \sin \omega t + \sqrt{2} V_2 \sin 2 \omega t)^2 \\ &= 2 V_1^2 \sin^2 \omega t + 4 V_1 V_2 \sin \omega t \sin 2 \omega t + 2 (V_2^2) \sin^2 2 \omega t \\ &= 2 V_1^2 \cdot 1/2 (1 - \cos 2 \omega t) * + 4 V_1 V_2 \times 1/2 \{ \cos (-\omega t) - \cos 3 \omega t \} ** \\ &\quad + 2 V_2^2 \times \frac{1}{2} (1 - \cos 4 \omega t) * \end{aligned}$$

$$* \quad \cos 2 \alpha = 1 - 2 \sin^2 \alpha$$

$$** \quad -2 \sin \alpha \sin \beta = \cos (\alpha + \beta) - \cos (\alpha - \beta)$$

عند حساب القيمة المتوسطة لمربع الجهد v^2 فى المعادلة السابقة على مدة زمنية دورية ، نجد أن الحدود التى تشمل $\cos (2\omega t)$ ، $\cos (-\omega t)$ ، $\cos (3\omega t)$ ، $\cos (4\omega t)$ تساوي صفرًا ، وهكذا فإن القيمة المتوسطة للدالة v^2 تكافئ $V_1^2 + V_2^2$ وحينئذٍ فإن المقدار الفعال $V\{V\}$ يستدل بالمعادلة الآتية :

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (5 - 3)$$

وعموماً فإن القيمة الفعالة للموجة غير الجيبية للجهد المتردد والمكون من التوافقيات العالية يشمل القيم الفعالة للجهد المستمر V_0 والتوافقيات V_1 ، V_2 ، V_3 كما يمكن وصفه بالمعادلة الآتية :

$$V = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots} \quad (5 - 4)$$

مثال ١

احسب المقدار الفعال $\{V\}$ للجهد .

$$v = \sqrt{2} \times 5 \sin \omega t + \sqrt{2} \times 4 \sin 2 \omega t + \sqrt{2} \times 3 \sin 3 \omega t \quad [V]$$

الحل

لحساب قيم المعاملات V_0, V_1, V_2, V_3 يتضح الآتي :

$$V_0 = 0, \quad V_1 = 5V, \quad V_2 = 4V, \quad V_3 = 3V.$$

ولذلك فإن المقدار الفعال V يحسب كالآتي :

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{5^2 + 4^2 + 3^2} \\ &= \sqrt{50} = 7.07V \end{aligned}$$

ب - معامل التشويه أو الانحراف Distortion factor

باستبعاد التوافق الأساسي : يمكن إفتراض أن المقدار الفعال للتوافقيات الأعلى للموجة غير الجيبية للجهد المتردد يكون $V_k [V]$ الذي يمثل بالمعادلة الآتية :

$$V_k = \sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots \dots} \quad (5-5)$$

وأن معامل التشويه أو الانحراف k يعرف بالنسبة المئوية للمقدار الفعال V_k مقسوماً على المقدار الفعال للتوافق الأساسي كما هو موضح بالمعادلة الآتية :

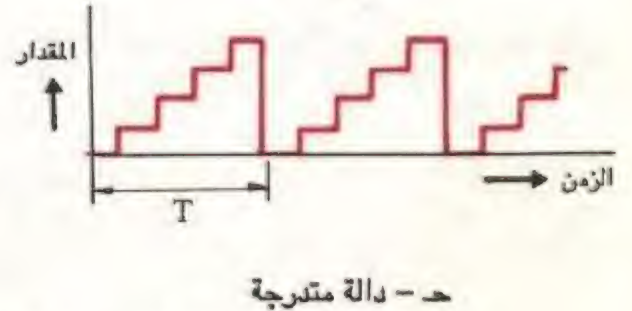
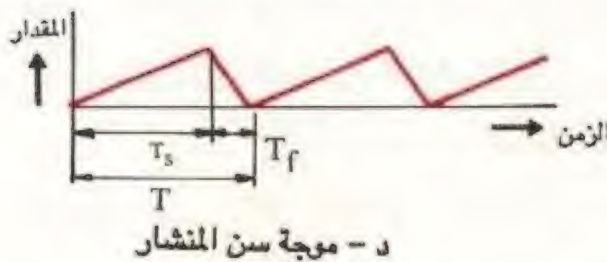
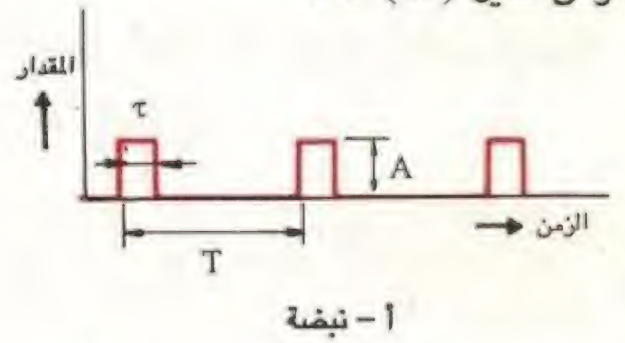
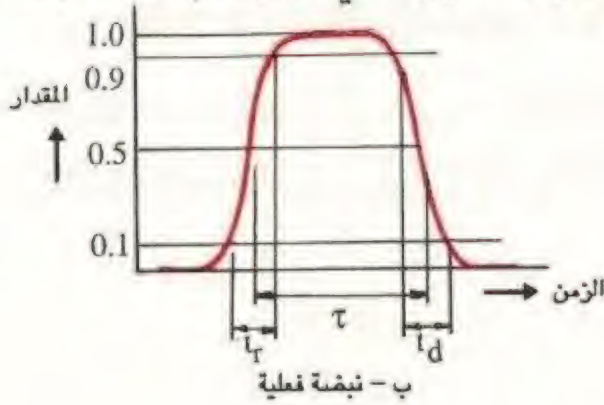
$$k = \frac{V_k}{V_1} \times 100 = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots \dots}}{V_1} \times 100 \quad [\%] \quad (5-6)$$

٥ - ١ - ٥ الاشكال الموجية المختلفة

توجد في الحياة العملية أشكال مختلفة من أنواع الموجات كما هو مبين في الشكل ٥ - ٦ .
ففي الشكل ٥ - ٦ (أ) نجد أن النبضة تتكون من جزء ثابت من الجهد المستمر الذي يتكرر كل مدة زمنية $T [S]$. ويكون عرض النبضة τ ومداها A ومدة تكرارها T والتردد التكراري $1/T$ ويعرف المقدار τ / T بعامل التشغيل .

ويوضح الشكل ٥ - ٦ (أ) شكل موجة مثالية بينما يظهر الشكل ٥ - ٦ (ب) تغير شكل الموجة النبضية بعد مرورها بالدائرة . ويسمى المقدار t_r بزمن صعود النبضة ويعرف زمن صعود النبضة بالزمن الذي يحتاجه طول النبضة لكي يرتفع من 10% إلى 90% في الجزء الأول من النبضة . وكذلك في الجزء الأخير من النبضة فإن زمن هبوط t_d مماثل لزمن صعود النبضة . ويتأثر عرض النبضة بزمنى الصعود والهبوط ويزداد عرض النبضة كلما زاد هذان الزمان .

ويبين الشكل ٥ - ٦ (ج) دالة الخطوة ، ويوضح تدرجاً متزايداً في الجهد ثم عودته بعد زمن معين $T (S)$.



الشكل ٥ - ٦ اشكال موجات مختلفة

ويوضح الشكل ٥ - ٦ (د) شكل موجة سن المنشار التي يزداد جهدها خطياً في المدة الزمنية $T_S [s]$ ثم تهبط إلى القيمة الابتدائية خلال مدة زمنية T_f ويسمى T_S بزمن المسح و T_f بزمن الرجوع . .

سؤال ٣

من الشكل ٥ - ٦ (أ) . احسب التردد التكراري؛ وعامل التشغيل عندما يكون عرض النبضة 1 ميكروثانية ، والدورة التكرارية 100 ميكروثانية .

سؤال ٤

اشرح مجال التطبيق لكل أشكال الموجات المذكورة في الشكل ٥ - ٦ .

يستخدم شكل موجة النبضة في عمل الحاسوب ؛ لان المعلومات في الحاسوب تستبدل بأعداد من النبضات لتمثل أشارات الإدخال التي يتم إجراء العمليات اللازمة عليها لتجهيز إشارات الإخراج كأرقام عددية ، أو إشارات ضوئية أو حركة ميكانيكية .
وتستخدم أيضاً الإشارات النبضية في عمل أجهزة الرادار والاستقبال التلفزيوني .

٥ - ٢ الظاهرة العابرة الكهربائية Transient phenomenon

في الدوائر الكهربائية التي تتكون من المكثفات الكهروستاتيكية وملفات الحث ، يختلف شكل موجة التيار عند لحظة فتح الدائرة عن شكله بعد الفتح واستقرار الدائرة .

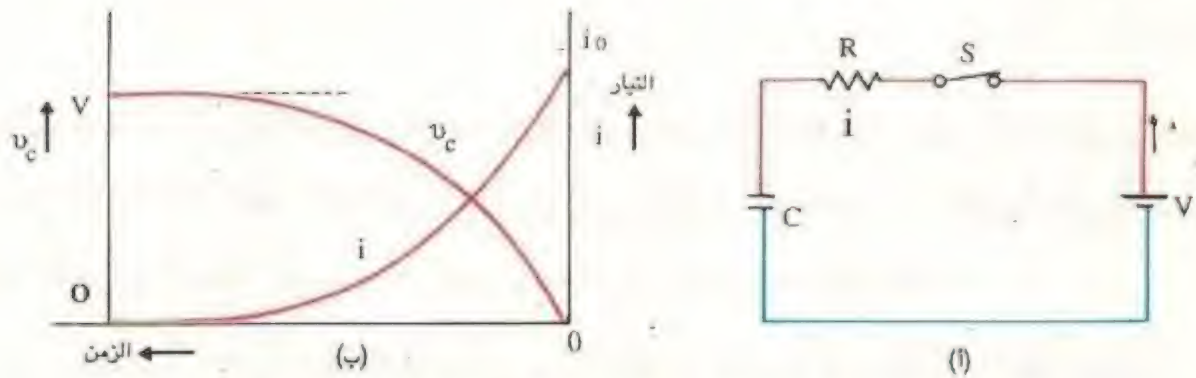
والمثال على ذلك يتضح من الدائرة الموضحة بالشكل ٥ - ٧ (أ) حيث نجد أن التيار يمر

لحظة الفتح ولا يمر بعد زمن معين عندما يكتمل شحن المكثف . وتسمى حالة الدائرة عندما تثبت قيمة التيار بالحالة الثابتة أو المستقرة . وتعرف الحالة العابرة للدائرة بحالتها من بدء مرور التيار وحتى لحظة استقرار التيار المار بالدائرة .
وفي البند التالي سوف نتناول تحليل ظاهرة الحالة العابرة .

٥ - ٢ - ١ الظاهرة العابرة للدائرة RC

١- الظاهرة العابرة لدائرة التوالي RC

إن تطبيق جهد ثابت V [V] DC على دائرة توالي RC كما هو موضح بالشكل ٥ - ٧ (أ) يجعل التيار i [A] يمر في المقاومة R [Ω] ويؤدي إلى شحن المكثف C [F] فيظهر نتيجة لذلك جهد عليه مقداره V_C [V] .



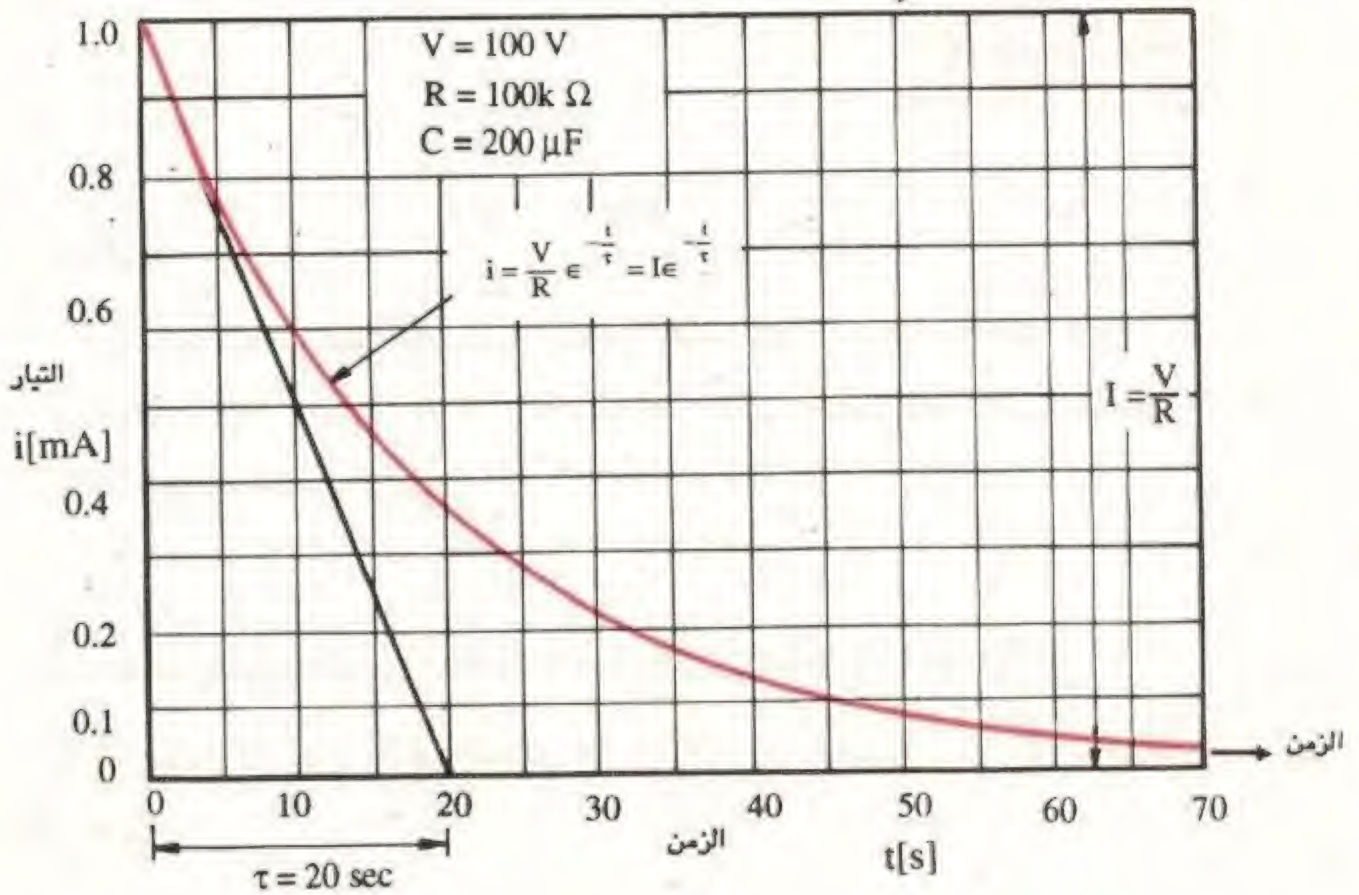
الشكل ٥ - ٧ الظاهرة العابرة لدائرة توالي RC .

والآن بجعل مفتاح التشغيل S في وضع التشغيل في الدائرة الموضحة بالشكل ٥ - ٧ (أ) ، فإن التيار i [A] يمر في الدائرة ، وتكون قيمته الابتدائية i_0 ثم يتناقص مع الزمن حتى يتلاشى وتصبح قيمته صفراً كما هو موضح بالشكل ٥ - ٧ (ب) . ويقاس الزمن العابر بالزمن المحصور بين القيمة الابتدائية والقيمة النهائية للتيار . وهكذا تظهر الظاهرة خلال الزمن العابر .

الجهد الواقع على المكثف $v_C[V]$ يزيد تدريجياً من القيمة الابتدائية $0V$ حتى يصل إلى جهد المصدر $V[V]$. في هذه الحالة فإن القيمة الابتدائية لجهد المكثف V_C تكون مساوية $0V$ والقيمة النهائية مساوية $V[V]$.

ب - خاصية تيار الشحن Charging current characteristic

إن الشكل ٥ - ٨ يبين خاصية منحنى التيار - الزمن عندما يكون جهد المصدر $V=100V$ ، $R=100k\Omega$ ، $C=200\mu F$ في الدائرة الموضحة في الشكل ٥ - ٨ (i).



الشكل ٥ - ٨ خاصية تيار الشحن للدائرة RC

وفي حين يعبر هذا المنحنى عن خاصية تيار الشحن يعبر عن المنحنى الأسّي رياضياً بالمعادلة الآتية :

$$i = \frac{V}{R} e^{-t/CR} = I e^{-t/CR} \quad (5-7)$$

وفي هذه المعادلة تمثل e الأساس اللوغاريتم الطبيعي، وتساوى عددياً (2.718). τ تسمى الثابت الزمني للدائرة وترمز لسرعة التغير في الحالة العابرة، ويقاس الثابت الزمني بيانياً بالقيمة $\tau = \vec{OP}$ حيث P هي نقطة تقاطع المحور الزمني وخط المماس المرسوم من النقطة الابتدائية ($i = 1\text{mA}$) كما هو موضح بالشكل ٥ - ٨. كما أن الدائرة المرسومة بالشكل ٥ - ٧ (أ) والمكونة من $R \{\Omega\}$ والمكثف $C [F]$ لها ثابت زمني τ ، يأتي بالمعادلة الآتية :

$$\tau = RC [s] \quad (5-8)$$

سؤال ٥

ارسم منحنى تيار الشحن لدائرة الشكل ٥ - ٧ (أ) حيث إن $V=100\text{V}$ ، $C = 100\mu\text{F}$ ، $R = 100\text{K}\Omega$ على المنحني البياني بالشكل ٥ - ٨ ؛ وكذلك احسب الثابت الزمني .

ح - خاصية جهد الشحن Charging voltage characteristic

عندما يعمل المفتاح S في الشكل ٥ - ٧ (أ) - كما سبق دراسته فإن التيار i يمر وتكون قيمته :

$$i = \frac{V}{R} e^{-t/CR} \quad [A]$$

وحينئذ يعبر عن الجهد $V_R[V]$ على المقاومة R بالمعادلة .

$$v_R = Ri = R \frac{V}{R} e^{-t/CR} = V e^{-t/CR} \quad (5-9)$$

ومن ناحية أخرى فإن الجهد $V_C[V]$ الواقع على المكثف يحسب بفرق الجهدين (جهد منبع التغذية $V[V]$ والجهد الواقع على المقاومة $R[\Omega]$) ويعبر عنه بالعلاقة :

$$v_c = V - v_R = V - V e^{-t/CR}$$

$$v_c = V (1 - e^{-t/CR}) \quad (5-10)$$

إن الحد الأول V في المعادلة (5-10) يمثل قيمة الجهد في الحالة المستقرة، وكذلك الحد الثاني $V e^{-t/RC}$ يمثل الجهد في الحالة العابرة ، وهكذا فإن الحد الأول يسمى الحد المستقر والحد الثاني يسمى الحد العابر .

سؤال ٦

ارسم خواص جهد الشحن للدائرة الموضحة بالشكل ٥ - (أ) والتي لها $V = 100 V$, $C = 200 \mu F$, $R = 100 K \Omega$ على الشكل البياني المبين بالشكل

٥ - ٨

٥ - ٢ - ٢ الدائرة التفاضلية والدائرة التكاملية

إن الدائرة التفاضلية والدائرة التكاملية المكونتان من المقاومة R والمكثف C ، تستخدمان على نطاق واسع في الدوائر الخاصة بمعالجة النبضات والظاهرة العابرة .

١ - الدائرة التفاضلية Differential circuit

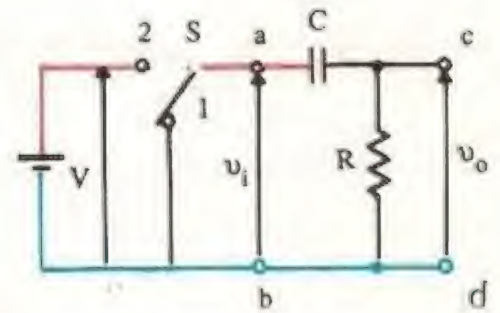
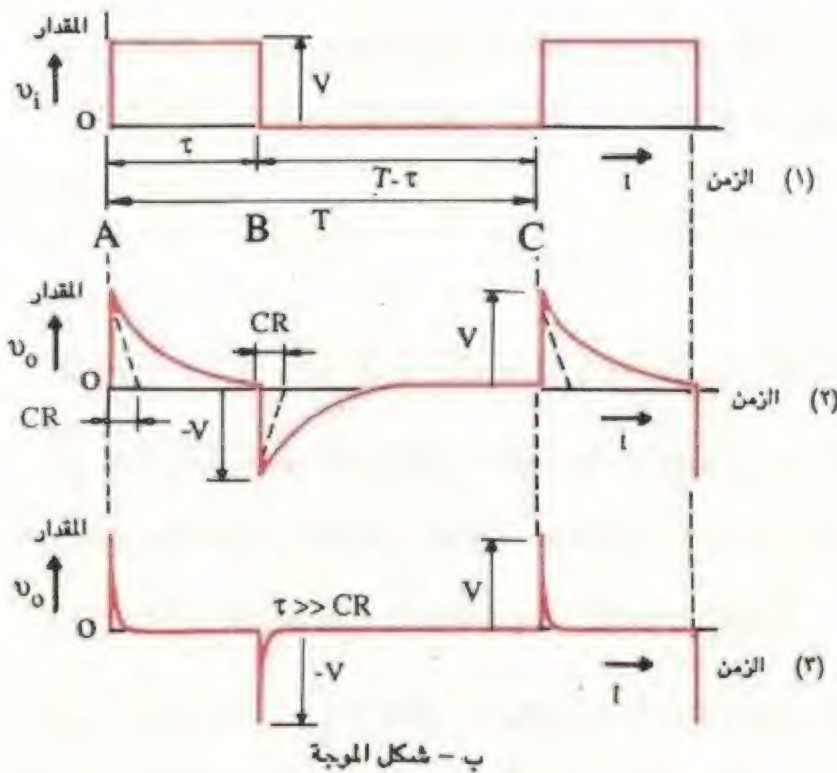
في الشكل ٥ - ٩ (أ) تمثل النهايتان a , b الدخل أما النهايتان c , d فهما يمثلان الخرج. وبافتراض أن المفتاح S يكون في الوضع 2 لزم $\tau [s]$ ويكون في الوضع 1

لزمَن $[s] (T - \tau)$. وأن تكرر هذا الوضع يعطي جهد الدخل $V_i[V]$ الموضح بالمنحنى (١) في الشكل ٩ - ٥ (ح) .

وفي هذه الحالة فإن تيار الشحن يمر في المقاومة $R[\Omega]$ عند الأزمنة C, A بالمنحنى (١) من الشكل ٩ - ٥ (ب) وتيار التفريغ يمر عند الزمن B . حينئذ يكون جهد الخرج $v_o[V]$ كما هو موضح بالمنحنى (٢) من الشكل ٩ - ٥ (ب) .

بالإضافة إلى ذلك فإن عرض شكل الموجة يختلف طبقاً لقيم الثابت الزمني CR .

إن القيم الصغيرة جداً للثابت الزمني $CR [s]$ بالمقارنة بالمدة الزمنية $\tau [s]$ تؤدي إلى ظهور الجهد v_o المبين بالمنحنى (٣) من الشكل ٩ - ٥ (ب) . وبمقارنة المنحنيات (١) مع (٢) في الشكل ٩ - ٥ (ب) يتضح أن تغير جهد الدخل $v_i[V]$ يجعل جهد الخرج $v_o[V]$ يظهر بهذه الصورة . هذه الدوائر تسمى الدوائر التفاضلية *



١ - دائرة التفاضل
 $\tau \gg CR$

الشكل ٩ - ٥ عمل دائرة التفاضل .

* في الدائرة التفاضلية ، المعادلة المعبرة عن شكل موجة الخرج تمثل بالمعادلة الناتجة عن تفاضل موجة الدخل .

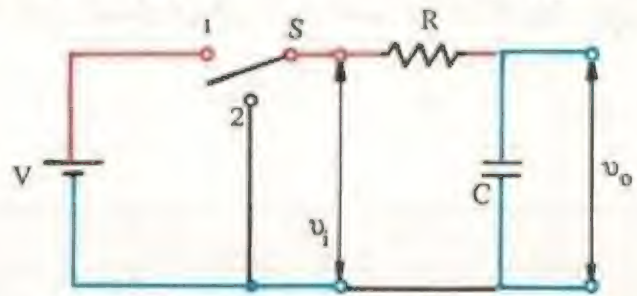
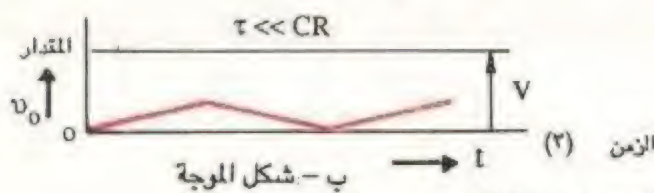
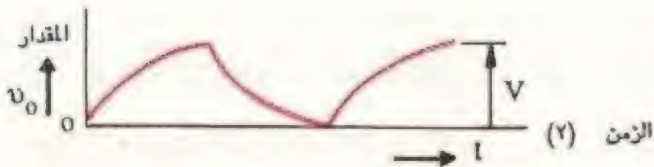
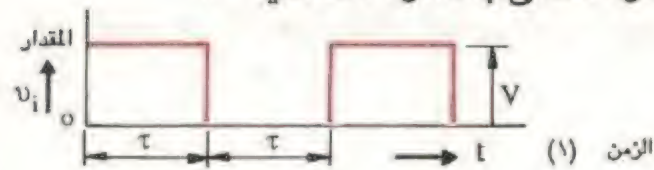
سؤال ٧

ماسبب حدوث النبضة الموجبة عند النقطة A والنبضة السالبة عند النقطة B في المنحنى (٣) بالشكل ٥ - ٩ (ب) .

ب - الدائرة التكاملية Integral circuit

إن جهد الدخل $v_i[V]$ يتغير بفتح وقفل المفتاح S المبين في الشكل ٥ - ١٠ (أ) ويمثل بالمنحنى (١) بالشكل ٥ - ١٠ (ب) . وكذلك جهد الخرج $v_o[V]$ المبين بالمنحنى (٢) من الشكل ٥ - ١٠ (ب) .

في هذه الحالة يكون الثابت الزمني CR [s] أعلى من عرض النبضة $\tau[s]$ وهو يجعل جهد الخرج v_o يزداد بالتناسب مع مضروب جهد الدخل v_i والزمن t كما هو مبين في المنحنى (٣) من الشكل ٥ - ١٠ (ب) . وهذه الدائرة تسمى بالدائرة التكاملية * .



١ - دائرة التكامل
 $\tau \ll CR$

الشكل ٥ - ١٠ عمل دائرة التكامل

سؤال ٨

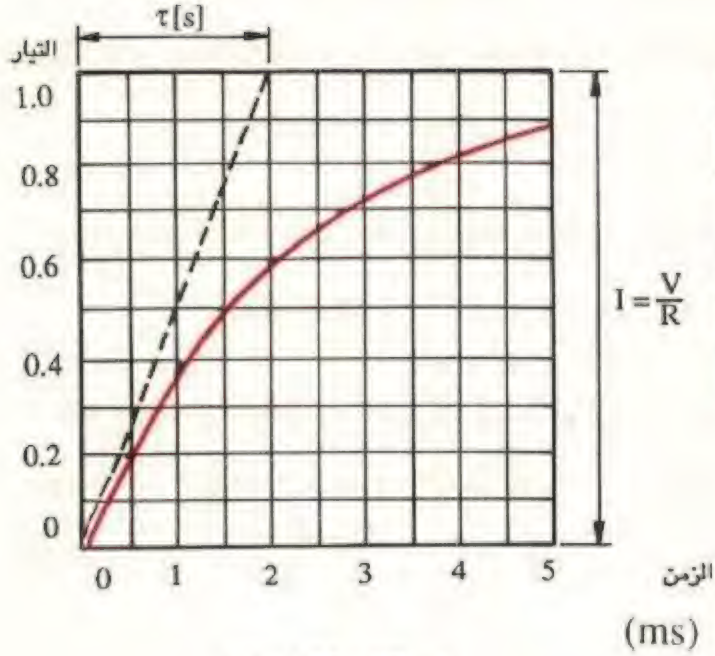
ارسم منحنى الجهد - الزمن كالمنحنى (٣) من الشكل ٥ - ١٠ (ب) عندما يكون $t = 10 \mu$, $CR = 1 \text{ ms}$, $V = 10 \text{ V}$ للدائرة الموضحة بالشكل ٥ - ١٠ (أ) .

٥ - ٢ - ٣ الظاهرة العابرة للدائرة R L

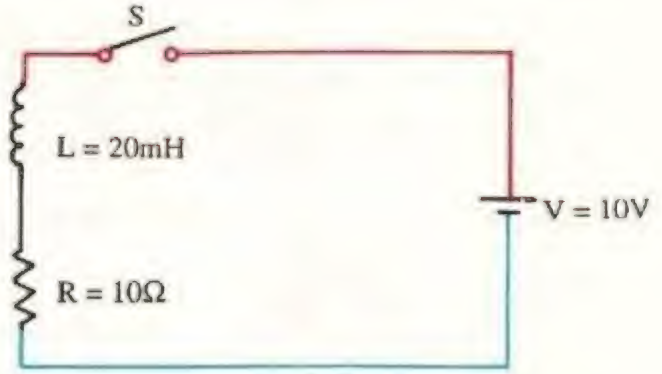
تطبيق جهد التيار المستمر $V [V]$ لدائرة موصلة على التوالي بمقاومة $R[\Omega]$ ومؤثر حثي $L[H]$ يجعل التيار الكهربائي يزيد الجهد المولد في المؤثر الحثي L مما ينتج الظاهرة العابرة للدائرة .

ويبين الشكل ٥ - ١١ (ب) خواص منحنى التيار العابر الناتج في الدائرة R L الموضحة بالشكل ٥ - ١١ (أ) ، حيث نجد في هذه الدائرة أن $L = 20 \text{ mH}$, $R = 10 \Omega$ عند وضع المفتاح S في وضع التشغيل يكون منحنى التيار i كما هو بالشكل ٥ - ١١ (ب) . ويتضح أن التيار i يصل بعد 5 ms بالقرب من $I = V/R = 10 \text{ V}/10 \Omega = 1 \text{ A}$ طبقاً لقانون أوم للتيار الثابت . ومع أن التيار يزيد طردياً خلال الزمن العابر ، إلا أن الملف L يولد جهداً يمنع زيادة التيار في الدائرة طبقاً لقانون لينز . حينئذ فإن التيار يصل إلى القيمة الثابتة بعد زمن كبير .

* وتمثل المعادلة المعبرة من شكل موجة الخرج معادلة تكامل لشكل موجة الدخل ولذا سميت الدائرة بدائرة تكامل .



ب - الخاصية العابرة للتيار



$$\tau = \frac{L}{R} \text{ [s]}$$

$$i = \frac{V}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \text{ [A]}$$

(ل) دائرة التوالي RL

الشكل ٥ - ١١ تجربة لحظية لشرح الخاصية العابرة لدائرة التوالي R L

إن القيم الكبيرة للملف L في دائرة التوالي RL تولد جهداً عابراً كبيراً مما يمنع زيادة التيار فيأخذ زمناً كبيراً ليصل إلى الحالة الثابتة .

سؤال ٩

اجعل مقاومة الملف 100Ω في الدائرة الموضحة بالشكل ٥ - ١١ (أ) ثم أحسب قيم التيار الابتدائية والنهائية .

خاصية التيار في دائرة التوالي RL

يشبه المنحنى الموضح بالشكل ١١ - ٥ (ب) منحنى الجهد v_C في الشكل ٥ - ٧ (ب) .
وهكذا فإن معادلة التيار i تكون مماثلة لمعادلة الجهد v_C كما يلي :

$$i = \frac{V}{R} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (5 - 11)$$

وفي هذه الحالة يعبر عن الثابت الزمني τ [s] بالمعادلة الآتية :

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (5 - 12)$$

فعلى سبيل المثال في الشكل ١١ - ٥ (ب) $R = 10\Omega$, $L = 20 \text{ mH}$ فيكون الثابت الزمني $\tau = 20 \text{ mH} / 10\Omega = 2 \text{ ms}$.
وهكذا نجد أن τ تكون مطابقة تماماً لنظيرها في الشكل ١١ - ٥ (ب) .

سؤال ١٠

احسب الثابت الزمني للملف $L = 40 \text{ mH}$ والمقاومة $R = 10$ في الدائرة الموضحة بالشكل ١١ - ٥ (أ) . كذلك ارسم منحنى الخاصية العابرة كما هو موضح بالشكل ١١ - ٥ (ب) .

سؤال ١١

نفترض أن الدائرة بالشكل ١١ - ٥ (أ) تشتمل على $V=100\text{V}$, $L=80\text{mH}$, $R=10\Omega$.
اكتب معادلة التيار كما هو مبين بالمعادلة (5 - 12) .
كذلك ارسم منحنى الخاصية العابرة للتيار i كما هو موضح بالشكل ١١ - ٥ (ب) .

تمارين

١ - بأفتراض أن الجهد :

$$v = 10 \sin 1000 \pi t + 2 \sin 2000 \pi t + 0.5 \sin 3000 \pi t \text{ [V]}$$

حينئذٍ احسب المتغيرات التالية :

(١) القيمة الفعالة للتوافق الأساسي .

(٢) القيم الفعالة للتوافق الثاني والثالث .

(٣) القيمة الفعالة الكلية للموجة غير الجيبية .

(٤) تردد التوافق الأساسي والثاني .

(٥) عامل التشويه (الانحراف) .

٢ - بفرض أن التيار يأخذ الشكل الآتي :

$$i = 10 \sin (1000 \pi t + \pi / 3) + 5 \sin 2000 \pi t + 0.4 \sin (3000 \pi t + \frac{\pi}{6})$$

تحت تأثير الجهد المذكور نفسه في السؤال الأول ، احسب المتغيرات التالية :

(١) القيمة الفعالة لموجة التيار غير الجيبية .

(٢) القيم الفعالة للتوافق الثاني والثالث .

٣ - ارسم شكل موجة الجهد غير الجيبية والممثلة بالمعادلة التالية : ثم احسب القيمة الفعالة وعامل التشويه (الانحراف) .

$$v = 10 \sqrt{2} \sin \omega t + \frac{10}{3} \sqrt{2} \sin 3 \omega t + 2 \sqrt{2} \sin 5 \omega t \text{ [V]}$$

٤ - قارن بين حساب الثابت الزمني CR وعرض النبضة τ في دائرة التفاضل .

٥ - قارن بين حساب الثابت الزمني CR وعرض النبضة τ في دائرة التكامل .

- ٦ - اشرح طريقة لتوليد موجة سن المنشار .
- ٧ - بفرض أن جهد تيار ثابت موصل بدائرة توالي من $R [\Omega]$, $C[F]$. ارسم شكل يوضح خاصية التيار - الزمن .
- ٨ - احسب الثابت الزمني في دائرة التوالي التي تتكون من المقاومة $R=1M \Omega$ والمكثف $C = 1 \mu F$.
- ٩ - احسب الثابت الزمني في دائرة التوالي التي تتكون من المقاومة $R = 2 \Omega$ والملف $L = 200 m H$.
- ١٠ - افترض أن التيار المار في دائرة التوالي $R \cdot L$ كما يلي :
- $$i = \frac{V}{R} (1 - e^{-t/\tau}) \quad [A]$$
- اكتب معادلتى الجهدين V_R , V_L .

الفصل السادس

اشباه الموصلات والدوائر الإلكترونية Semiconductors and electronic circuits

يسمى العصر الحاضر عصر الإلكترونيات ، ونحن نرى أجهزة إلكترونية كثيرة مثل التلفزيون وأجهزة الموسيقى والاستريو وأجهزة التسجيل والحواسيب ؛ أضف إلى ذلك استخدام الإلكترونيات في التحكم في عمل الماكينات وتشغيل الإنسان الآلى (الروبوت) .

وقد أمكن تطبيق الإلكترونيات بطريقة مفيدة في مجالات واسعة جداً ، ومن المتوقع تطورها بسرعة تتناسب مع تطوير أى مواد أو تقنيات جديدة .

وتقع أشباه الموصلات والدوائر الإلكترونية عند مركز الإلكترونيات بتطبيقاتها الواسعة . وفى هذا الفصل سوف ندرس الخواص الأساسية لأشباه الموصلات وكيفية تركيب واستخدام الثنائيات والترانزستورات والدوائر الإلكترونية المختلفة .

٦ - ١ أشباه الموصلات والثنائى Diode

٦ - ١ - ١ الذرة والالكترون Atom and electron

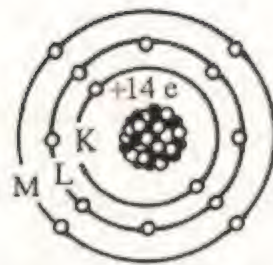
تتكون المادة من مجموعة من الجزيئات . ويتكون الجزيء من ذرات ؛ وتحتوي الذرة على نواة لها شحنة موجبة في المركز وعلى إلكترونات ذات شحنات سالبة تدور حول النواة . وتسمى المدارات التى تدور فيها الالكترونات بغلاف الإلكترون، وتأخذ أسماء غلاف K وغلاف L وغلاف M ... بدءاً من الداخل . ويتحدد عدد الالكترونات المسموح له بالدوران في كل مدار بالمعادلة :

$$n = 2 N^2$$

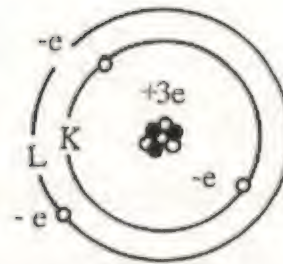
$$(6 - 1)$$

عدد الإلكترونات التي
يستطيع كل غلاف أن يحتويها

2	غلاف K
8	غلاف L
18	غلاف M
32	غلاف N



(ج) السيليكون



(ب) الليثيوم



(أ) الهيليوم

الشكل ٦ - ١ تركيب عدة ذرات .

حيث N هو رقم المدار (1 , 2 , 3 ... من الداخل) . وفي المدار K يستطيع 2 إلكترون (2×1^2) الدوران أما في المدار L فيستطيع 8 إلكترونات (2×2^2) الدوران . وتسمى الإلكترونات التي تدور في أقصى مدار خارجي إلكترونات التكافؤ .

سؤال ١

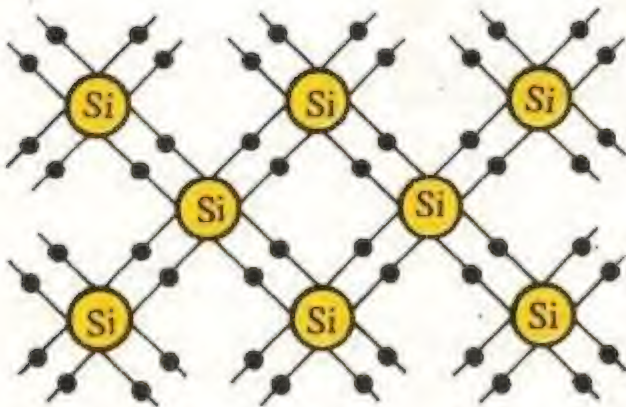
احسب عدد الإلكترونات المسموح لها بالدوران في غلاف M .

٦ - ١ - ٢ أشباه الموصلات

أ - أشباه الموصلات الذاتية Intrinsic semiconductors

يحتوي كل من السيليكون (Si) والجرمانيوم (Ge) على أربعة إلكترونات تكافؤ وتحتوي كل ذرة منها على إلكترونات تكافؤ تمكنها من تكوين بلورة . وتسمى هذه الحالة بالرابطة التساهمية، ويبين الشكل ٦ - ٢ (أ) إلكترونات التكافؤ للرابطة التساهمية. أما الشكل ٦ - ٢ (ب) والشكل ٦ - ٢ (ج) فيوضحان ثلاثة وخمسة إلكترونات تكافؤ على الترتيب .

ويبين الشكل ٦ - ٢ (د) رسم سطحي للبلورة المفردة، وهي بلورة تتكون من سيليكون أو جرمانيوم فقط ولها أربعة إلكترونات تكافؤ . وعلى الرغم أن إلكترونات التكافؤ تنجذب إلى نواة الذرة في درجات الحرارة المنخفضة بالقرب من (0K) فإنها تترك النواة وتتحرك بين الذرات متأثرة بالطاقة الحرارية عند درجة الحرارة العادية (20°C) . وهذا النوع من الإلكترونات يسمى الإلكترون الحر وينقل الكهرباء ، ويزيد عدد الإلكترونات الحرة مع زيادة درجة الحرارة .



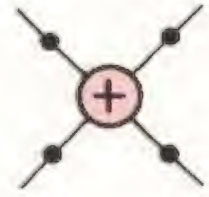
(د) شبكة بلورية كاملة للسيليكون



(ح) خمسة إلكترونات تكافؤ



(ب) ثلاثة إلكترونات تكافؤ

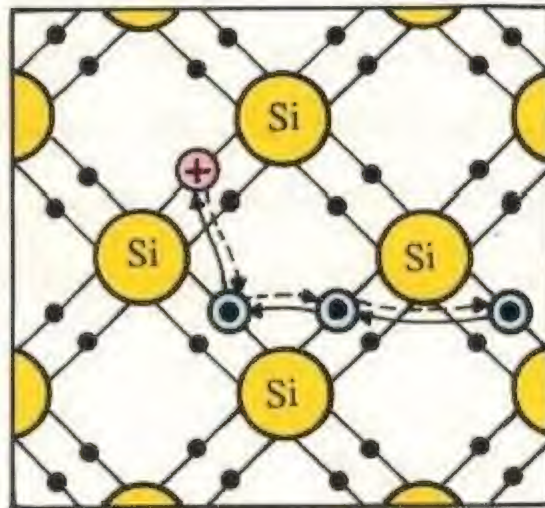


(أ) أربعة إلكترونات تكافؤ

الشكل ٦ - ٢ Valence electrons إلكترونات التكافؤ

عندما يترك الإلكترون سالب الكهرباء مكاناً فإن هذا المكان يصبح موجب الكهرباء ويسمى فجوة . وتعامل الفجوة كأنها جسيم له شحنة كهربائية موجبة تساوى قيمة شحنة الإلكترون . ويبين الشكل ٦ - ٣ حركة الفجوة ، ويسمى الإلكترون أو الفجوة التي تحمل الكهربائية «الحامل».

والمواد مثل السيليكون والجرمانيوم، وتلك المخلوطة بقليل من الشوائب لها مقاومة نوعية بين الموصلات والعوازل (أي إنها أشباه موصلات) وتقل مقاومتها النوعية عند تعرضها للطاقة الضوئية أو الحرارية . وهذه المواد هي أشباه الموصلات ، وشبه الموصل له أداء تقويى وتأثير (هول) كبير .



-----> كيفية تحرك الفجوة
 -----> كيفية تحرك الإلكترون التكافؤ

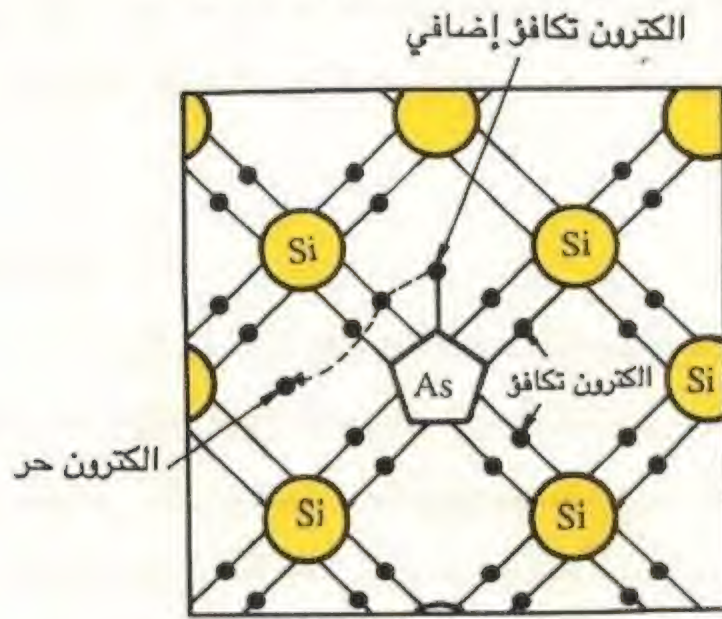
الشكل ٦ - ٣ شبكة بلورية ينقصها إلكترون تكافؤ واحد

ويتطلب إنتاج أدوات أشباه الموصلات بلورة Crystal مفردة من السيليكون أو الجرمانيوم بدرجة نقاء عالية جداً . . . 99.999% (تسمى إحدى عشر تسعة) . وشبه الموصل الذاتي له هذه الدرجة من النقاء .

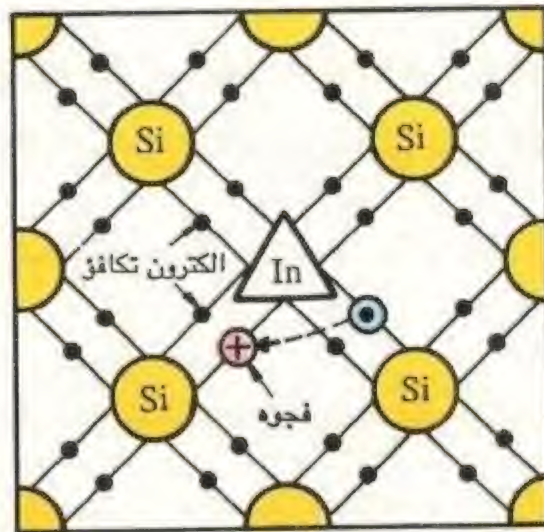
ب - شبه الموصل ذو الشوائب Impurity semiconductor

(١) شبه الموصل نوع n

يبين الشكل ٦ - ٤ تركيب البلورة ، وفيه أضيفت كمية قليلة من الزرنيخ الذي له خمسة إلكترونات تكافؤ إلى السيليكون ذي الإلكترونات الأربعة للتكافؤ .



الشكل ٦ - ٤ شبه موصل نوع n



الشكل ٦ - ٥ شبه موصل نوع p

ويستطيع الإلكترون الحر أن يتحرك بسهولة عند تسليط جهد عليه . وفى حالة شبه الموصل نوع - n يمكن بإضافة كمية قليلة من مادة لها خمسة إلكترونات تكافؤ إلى مادة أخرى لها أربعة إلكترونات تكافؤ فإن الإلكترونات ذات الكهرباء السالبة تقوم بحمل الكهرباء . ويحتوي شبه الموصل نوع - n على كمية قليلة من الفجوات عند درجة الحرارة العادية . ولهذا فإن الإلكترونات تسمى الحاملات الأغلبية أما الفجوات فتسمى الحاملات الأقلية . والمادة التى لها خمسة إلكترونات تكافؤ مثل الفوسفور والارصين والأنتيمون تسمى مادة "مانحة" .

(٢) شبه الموصل نوع - p

يبين الشكل ٦ - ٥ تركيب بلورة وفيها أضيفت كمية قليلة من الأنديموم الذي له ثلاثة إلكترونات تكافؤ إلى السيليكون ذي الإلكترونات الأربعة للتكافؤ . وتولد الذرة ذات الإلكترونات الثلاثة للتكافؤ فجوة فى مكان رحيل الإلكترون . وهكذا فإنه عند مزج مادة تحوي ثلاثة الإلكترونات تكافؤ مع مادة ذات أربعة إلكترونات تكافؤ ينتج عدد كبير من الفجوات التى تصبح حاملات للكهرباء . ولهذا فإنه فى شبه الموصل نوع - p تقوم الفجوة الموجبة الكهربائية بحمل الكهرباء .

وفى شبه الموصل نوع - p نجد أن الحاملات الأغلبية هي الفجوات، والحاملات الأقلية هي الإلكترونات . ومادة الشوائب مثل الجاليوم والأنديموم تسمى مادة "قابلة" .

سؤال ٢

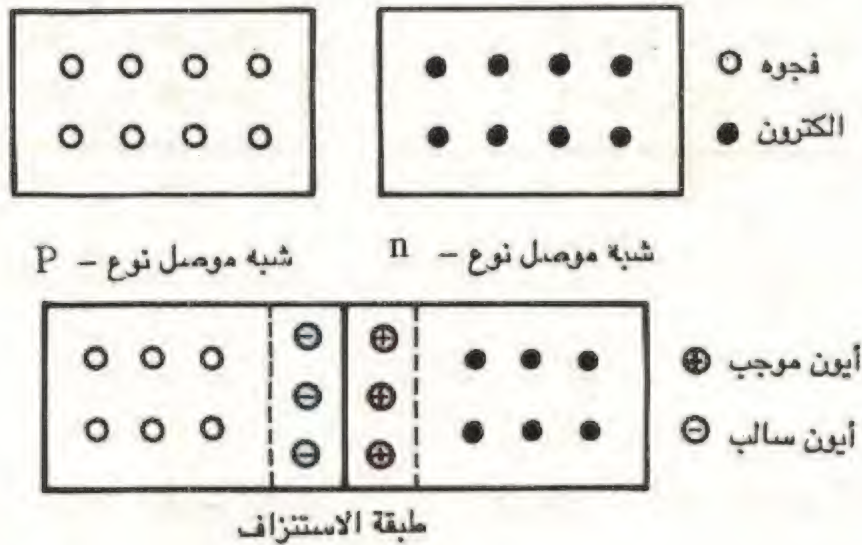
ما الحاملات الأغلبية فى شبه الموصل نوع - p وشبه الموصل نوع - n ؟

٦ - ١ - ٣ الثنائي (وصلة - pn)

وصلة - pn هي منطقة بين شبه موصل نوع - p وشبه موصل نوع - n تم تكوينها بإضافة مادة قابلة ومادة مانحة إلى بلورة مفردة من السيليكون أو الجرمانيوم ذات نقاء عال . وحول حدود وصلة - pn تسرى الفجوات (الحاملات الأغلبية في المنطقة نوع - p) في اتجاه المنطقة نوع - n ، أما الإلكترونات (الحاملات الأغلبية في المنطقة نوع - n) فتسرى في اتجاه المنطقة نوع - p ، وهذه الحركة للحاملات المتسببة عن فرق كثافتها في المنطقتين تسمى "الانتشار" .

ويبين الشكل ٦ - ٦ أن الانتشار ينتج أيونات موجبة حول حدود منطقة n وأيونات سالبة حول حدود منطقة p . وتقوم الأيونات السالبة بمنع انتشار الإلكترونات من شبه الموصل n وتقوم الأيونات الموجبة بمنع انتشار الفجوات من شبه الموصل p . وتعمل هذه الأيونات كعائق لمنع انتشار الحاملات وتوجد توازناً بين حركة الحاملات .

تنشأ طبقة استنزاف حول الحدود بعد حدوث التوازن وتحتوى هذه الطبقة على أيونات فقط دون الحاملات . وعلى جانبي طبقة الاستنزاف يتم الفصل بين الحاملات الأغلبية ، الفجوات والإلكترونات .

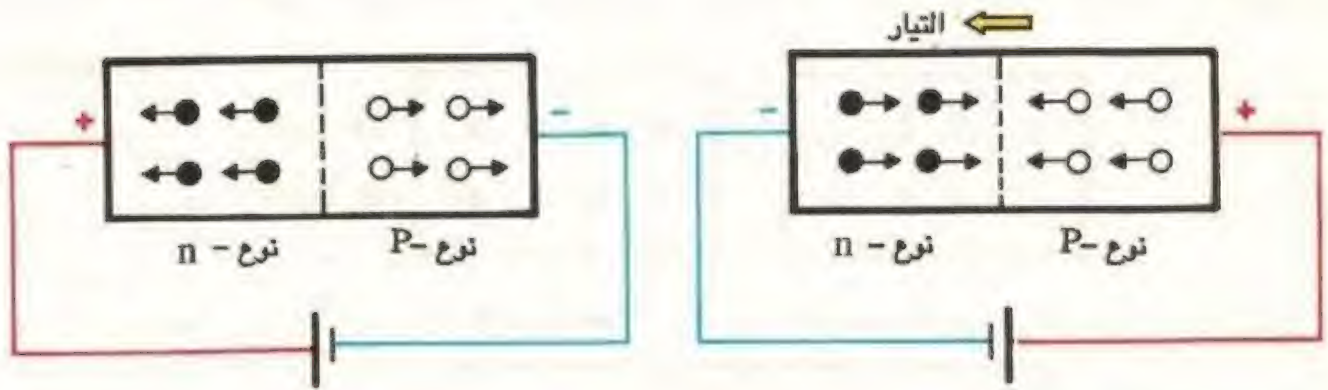


الشكل ٦ - ٦ وصلة - pn

١ - الجهد الأمامي والعكسي Forward and reverse voltage

عند توصيل جهد إلى وصلة pn كما في الشكل ٦ - ٧ تتحرك الفجوات من منطقة p إلى منطقة n بتأثير قوة تنافر الجهد الموجب. كما تتحرك الإلكترونات من منطقة n إلى منطقة p بتأثير قوة تنافر الجهد السالب. وإذا زاد الجهد على قيمة معينة تسرى الحاملات في المنطقة الأخرى فيما وراء العائق وينشأ عن ذلك مرور تيار كهربائي. وهذا النوع من الجهد يسمى "الجهد الأمامي". وتدفق الفجوات من منطقة p إلى منطقة n ، وتدفق الإلكترونات من منطقة n إلى منطقة p يسمى "الحقن".

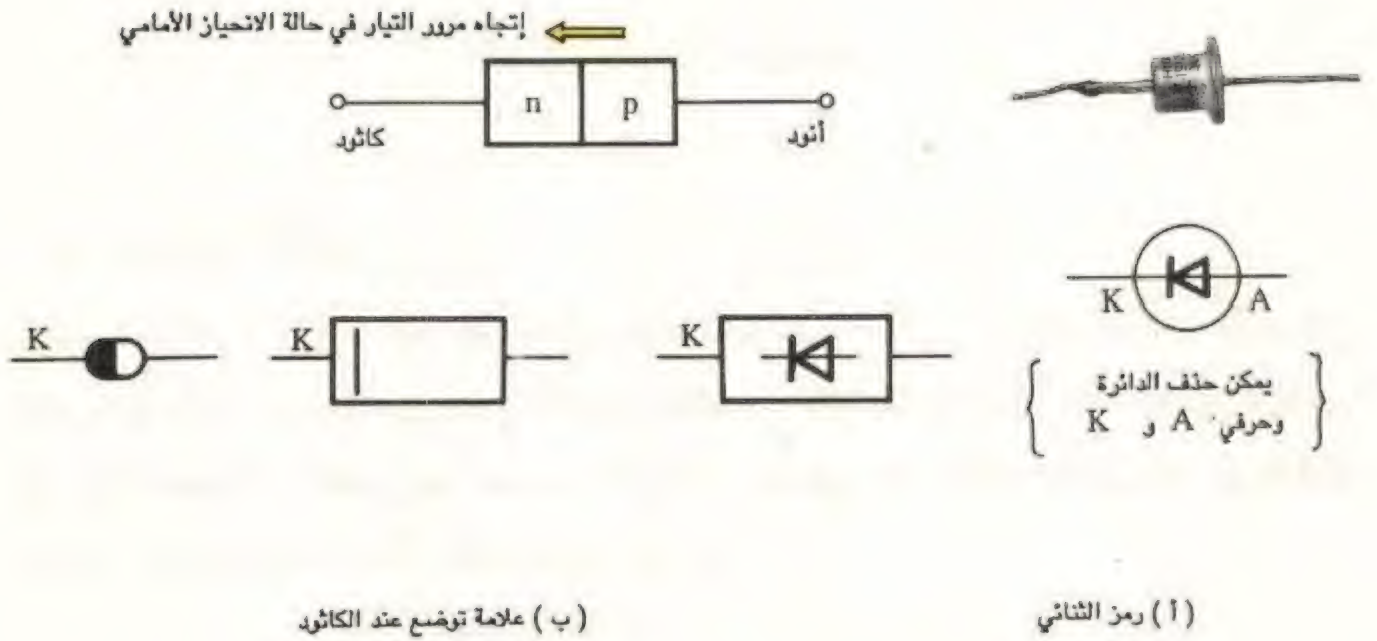
وعند توصيل جهد إلى وصلة pn كما في الشكل ٦ - ٨ ينجذب نوعي الحاملات إلى كل نهاية بمفرده ولا يحدث الحقن ولا يمر تيار. وهذا النوع من الجهد يسمى "الجهد العكسي". نستنتج من ذلك أن وصلة pn تسمح للتيار بالمرور في أحد الاتجاهات ولا تسمح له بالمرور في الاتجاه العكسي. أي أنها تؤدي عملية تقويم.



الشكل ٦ - ٧ الجهد الأمامي الشكل ٦ - ٨ الجهد العكسي

ب- تركيب الثنائي ورمزه

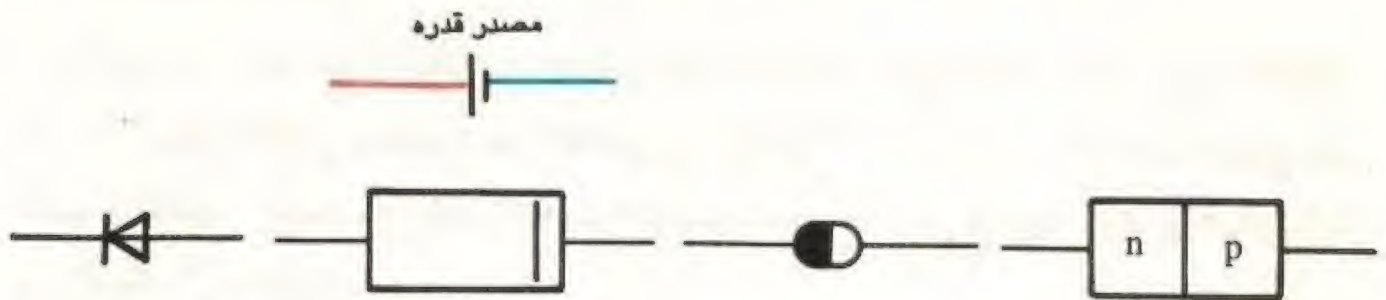
الثنائي هو جهاز ذي 2 إلكترود ، ويؤدي عملية تقويم كما في وصلة pn . ويبين الشكل ٩ - ٦ منظر الثنائي ويظهر رمز الثنائي في الشكل ٩ - ٦ (أ) . وأطراف الثنائي هي الأنود والكاثود . وتوضع علامة عند الكاثود في الثنائي لتسهيل تمييز طرفيه كما في الشكل ٩ - ٦ (ب) .



الشكل ٩ - ٦ الثنائي

سؤال ٣

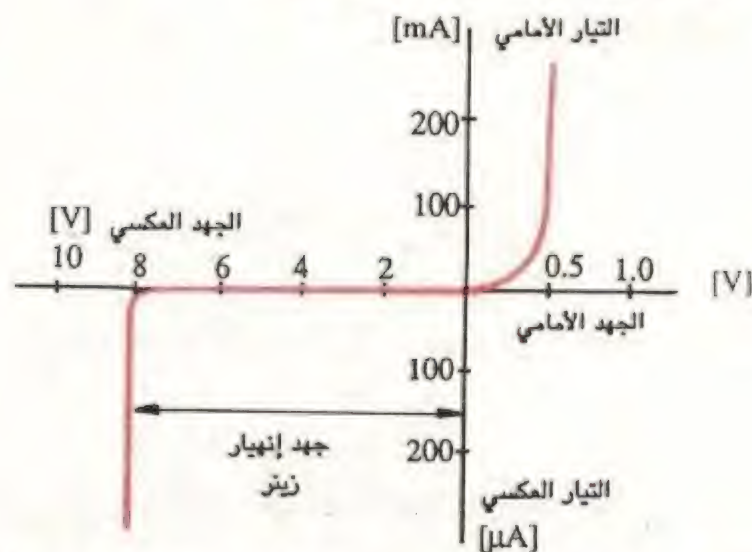
قم بتوصيل جهد أمامي على الثنائيات في الشكل ٦ - ١٠ .



الشكل ٦ - ١٠ ثنائيات

ح - خواص الثنائي

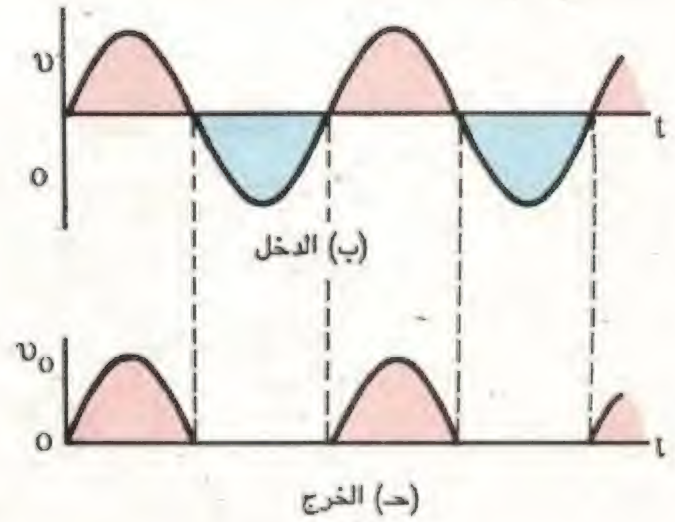
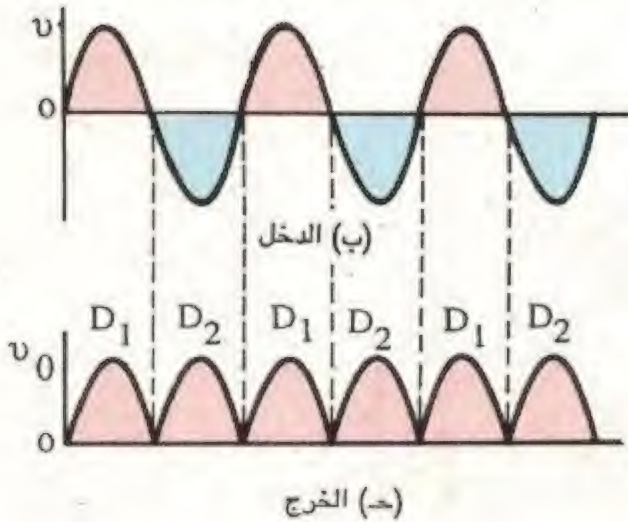
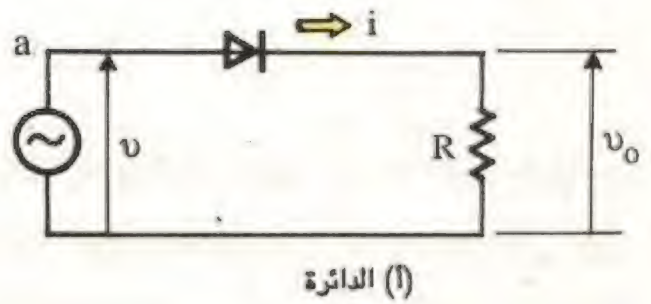
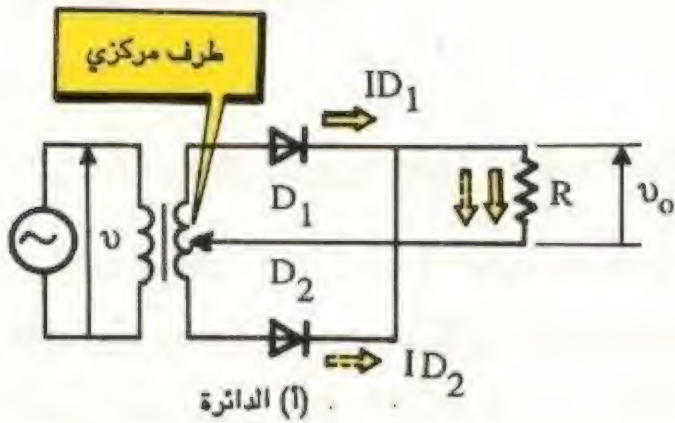
يبين الشكل ٦ - ١١ العلاقة بين الجهد والتيار في الثنائي . ويسمح للتيار بالمرور في الاتجاه الأمامي، ويمنع مروره في الاتجاه العكسي . ومع ذلك فإنه إذا زاد الجهد العكسي على قيمة معينة فإن التيار يمر بصورة مفاجئة ، وتسمى هذه الظاهرة تأثير زينر أو ظاهرة الانهيار ، وتسمى هذه القيمة المعينة للجهد جهد زينر .



الشكل ٦ - ١١ منحنى علاقة التيار بالجهد في الثنائي

٦ - ١ - ٤ دائرة التقويم Rectifying circuit

تقوم دوائر التقويم بتحويل التيار المتغير (AC) إلى تيار ثابت (DC) . ويمكن تقسيمها إلى دوائر تقويم نصف موجة ودوائر تقويم موجة كاملة .



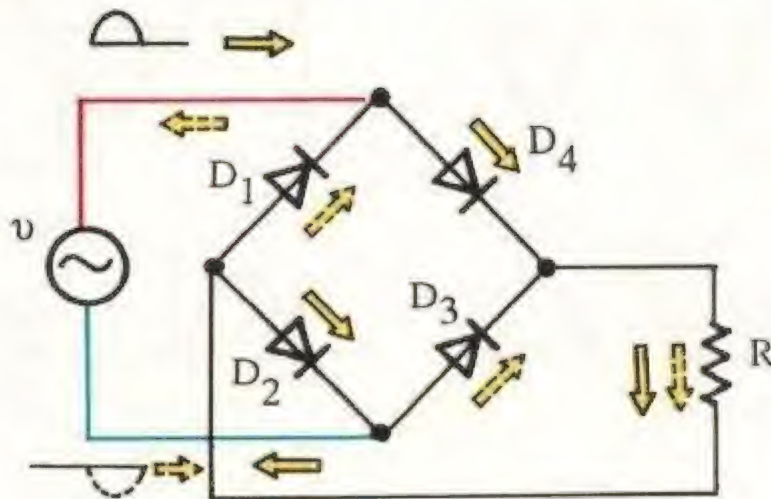
الشكل ٦ - ١٢ دائرة تقويم نصف موجة الشكل ٦ - ١٣ دائرة تقويم موجة كاملة

١ - دائرة تقويم نصف موجة Half wave

عند توصيل تيار متغير لدائرة تقويم نصف موجة كالمبينة بالشكل ٦ - ١٢ (أ) نحصل على جهد الخرج المبين في الشكل ٦ - ١٢ (ج) نتيجة للأداء التقويمي للثنائي . ويمر التيار فقط عندما تكون النقطة (a) موجبة لنحصل على نصف الجهد المتغير . وتسمى هذه الدائرة دائرة تقويم نصف موجة .

ب - دائرة تقويم موجة كاملة Full wave

يبين الشكل ٦ - ١٣ (أ) أنه باستخدام دائرة تقويم تحتوى على ثنائيين بخواص متشابهة، ومحول له طرف مركزي للملف الثانوى يمر التيار بالتناوب إلى الثنائيين ليعطى جهد الخرج المبين في الشكل ٦ - ١٣ (ج) . وهذه الدائرة الخاصة بتقويم موجة كاملة تعطي كل جهد الدخل عند الخرج . وتعطي دائرة تقويم الموجة الكاملة تياراً ثابتاً (DC) بصورة أكثر فعالية من دائرة تقويم نصف الموجة .



الشكل ٦ - ١٤ دائرة تقويم القنطرة

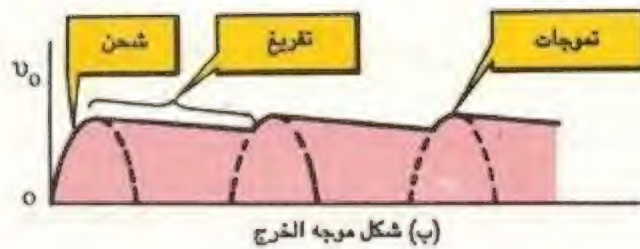
ويبين الشكل ٦ - ١٤ دائرة تقويم موجة كاملة مكونة من 4 ثنائيات ذات خواص متشابهة وتسمى دائرة تقويم "القنطرة" ؛ ولا يحتاج هذا النوع من دوائر التقويم المحول ذي الطرف المركزى للملف الثانوي. كما أن الثنائي ذا الجهد العكسي المنخفض مستخدم لأن الجهد العكسي المسلط على الثنائيات في هذه الدائرة انخفض إلى نصف الجهد العكسي على الثنائيات في دائرة الشكل ٦ - ١٣

ويتبين من الشكل ٦ - ١٣ (ب) والشكل ٦ - ١٣ (ج) أن تردد جهد الخرج لدائرة تقويم الموجة الكاملة ضعف تردد جهد الدخل .

ج - دائرة التنعيم Smoothing circuit

يحتوي جهد خرج دوائر تقويم نصف الموجة، وتقويم الموجة الكاملة على مكونات متغيرة كثيرة . والمكونات المتغيرة التي يحتويها خرج دائرة التقويم تسمى التموجات ، ويمكن تقليل التموجات باستخدام مكثف كما في الشكل ٦ - ١٥ .

ويقوم هذا المكثف بتخزين الشحنة الكهربائية لمنع الهبوط المفاجئ للجهد، ويساعد على الاحتفاظ بأقصى قيمة للخرج من الدخل .



الشكل ٦ - ١٥ دائرة التنعيم

في حالة عدم مرور التيار في الثنائي فإن الشحنة المخزنة في المكثف تفرغ خلال المقاومة R. وكلما زاد الثابت الزمني RC قلت سرعة انخفاض الجهد . وتتراوح قيمة المكثف C من عدة مئات من الميكروفاراد إلى عدة آلاف ميكروفاراد وهذه الدائرة هي دائرة تنعيم والمكثف هو مكثف التنعيم .

وقيمة سعة مكثف التنعيم في دائرة تقويم الموجة الكاملة يمكن أن تكون نصف قيمة سعة مكثف التنعيم في دائرة تقويم نصف الموجة ؛ لأن تردد التموجات في دائرة تقويم الموجة الكاملة ضعف تردد مصدر القدرة في دائرة تقويم نصف الموجة كما في الشكل ٦ - ١٣

سؤال ٤

إذا كان تردد دخل التقويم 60 هرتز. احسب تردد التموجات في دوائر تقويم نصف الموجة ودوائر تقويم الموجة الكاملة .

سؤال ٥

إذا كانت القيمة الفعالة للجهد المتغير الجيبي عند دخل دائرة تقويم بها دائرة تنعيم هي 20 فولت . احسب قيمة الجهد المستمر الذي نحصل عليه .

٦ - ٢ الترانزستور Transistor

٦ - ٢ - ١ تركيب ومبدأ عمل الترانزستور

تستخدم الترانزستورات والدوائر المتكاملة المختلفة في الأجهزة الالكترونية مثل أجهزة استقبال التلفزيون والحواسيب . ويرتكز عمل الدائرة المتكاملة على دوائر الترانزستور . وللترانزستور إمكانية تكبير الإشارة الكهربائية ، وتستخدم إمكانية التكبير في دوائر التكبير

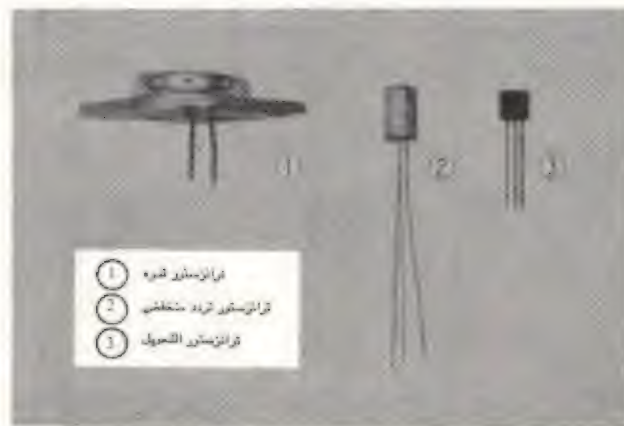
المختلفة ودوائر المذبذبات لتوليد إشارات الموجة الجيبية ودوائر تعديل الموجة الحاملة المستخدمة في الاذاعة والاتصالات .

أ- تركيب الترانزستور

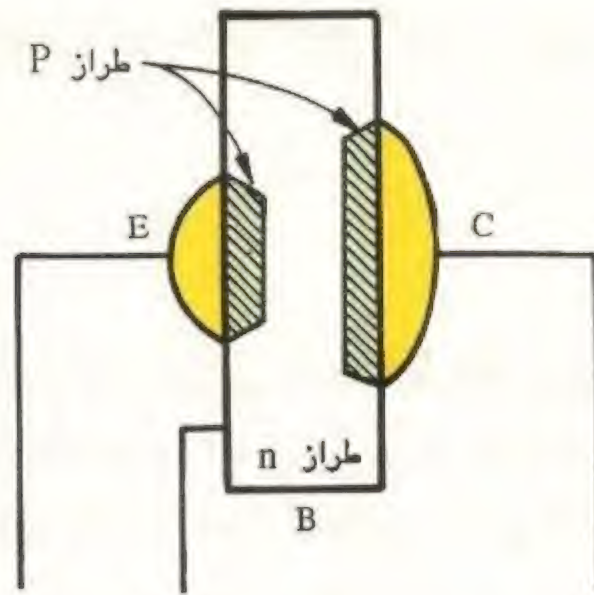
عند وضع شرائح الأنديموم ذات الإلكترونات الثلاثة للتكافؤ على جانبي شبه موصل السيليكون نوع n وتسخينها فإنها تنصهر جزئياً في السيليكون لتكون مناطق نوع p على جانبي شريحة السيليكون . ثم يتم لصق الأقطاب كما في الشكل ٦ - ١٧ .

هذه الطريقة تصنع وصلة pnp التي يتكون منها الترانزستور . والأقطاب هي الباعث (E) للإمداد بالحاملات ، والمجمع (C) لاستقبال الحاملات ، والقاعدة (B) للتحكم في الحاملات .

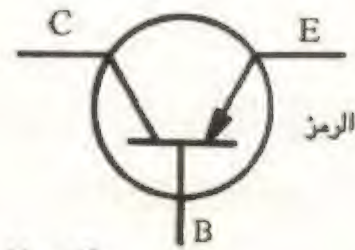
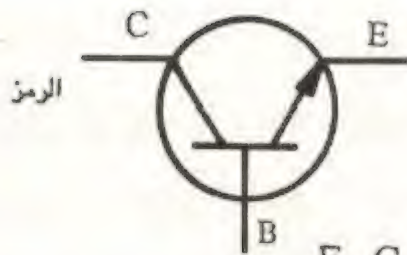
ويبين الشكل ٦ - ١٦ المظهر الخارجي للترانزستور ، كما يبين الشكل ٦ - ١٧ التركيب الداخلي له . ويبين الشكل ٦ - ١٨ ترانزستور طراز pnp وترانزستور طراز nnp طبقاً لتجميع شبه موصل p وشبه موصل n وهناك عدة طرق لصناعه الترانزستورات.



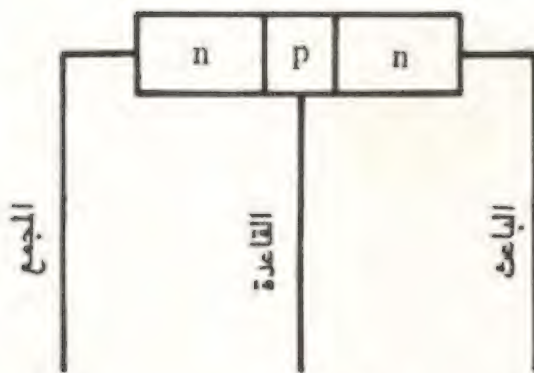
الشكل ٦ - ١٦ المظهر الخارجي للترانزستورات



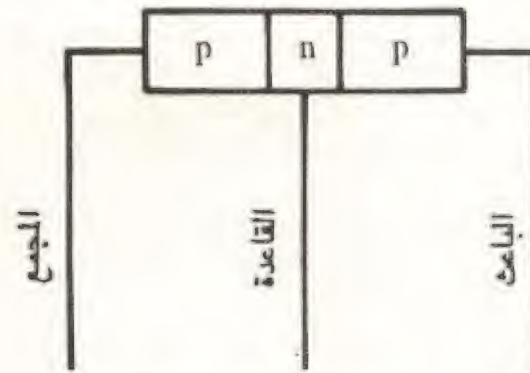
الشكل ٦ - ١٧ التركيب الداخلي لترانزستور وصلة السبيكة



يمكن حذف الدائرة وحروف E , C , B



(ب) نوع npn



(أ) نوع pnp

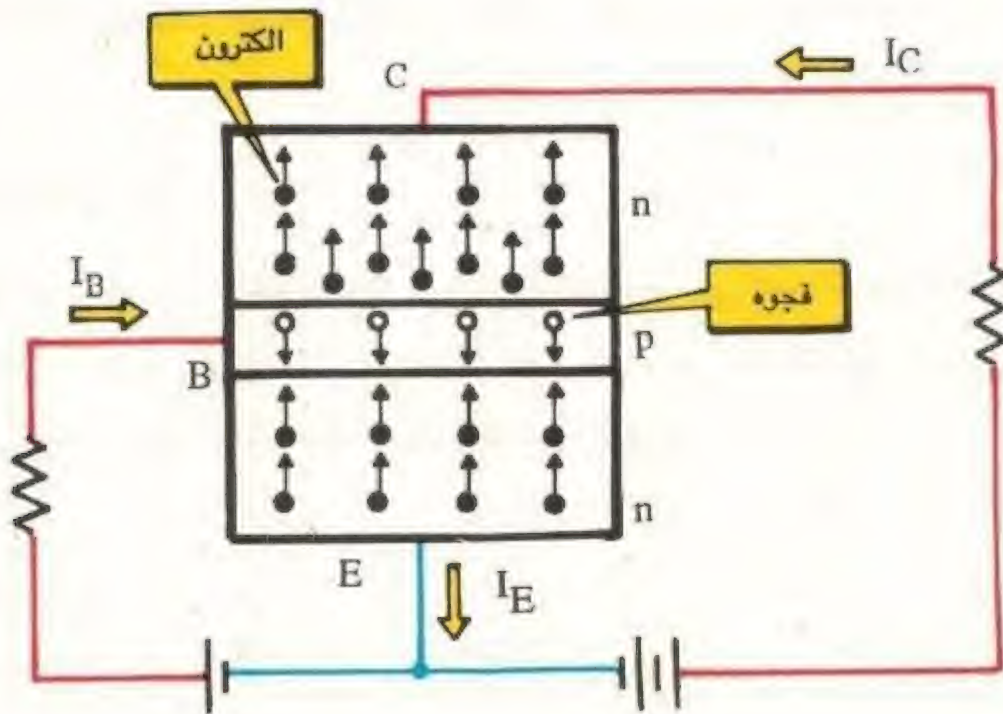
أسماء الأطراف

الشكل ٦ - ١٨ رموز الترانزستورات وأسماء أطرافها

ب- مبدأ عمل الترانزستور

في ترانزستور npn المبين في الشكل ٦ - ١٩ نجد أن القطب الباعث هو الطرف المشترك بين دائرتي الدخل والخرج ، ويوجد جهد أمامي بين القاعدة والباعث وجهد عكسي بين القاعدة والمجمع . وفي هذه الحالة تتحرك الإلكترونات (الحاملات الأغلبية) من منطقة الباعث إلى منطقة القاعدة، ويدخل الإلكترونات منطقة القاعدة تتعادل مع الفجوات ، وإذا كانت منطقة القاعدة ضيقة جداً فإن عدداً قليلاً من الإلكترونات تستطيع القاعدة إمساكه أما معظم الإلكترونات (99.5 - 99 %) فتصل إلى منطقة المجمع . ويدخل الإلكترونات منطقة المجمع تؤثر عليها قوة نتيجة للجهد الموضوع على المجمع، وتتجمع حول طرف المجمع وينتج عن ذلك تيار المجمع I_C .

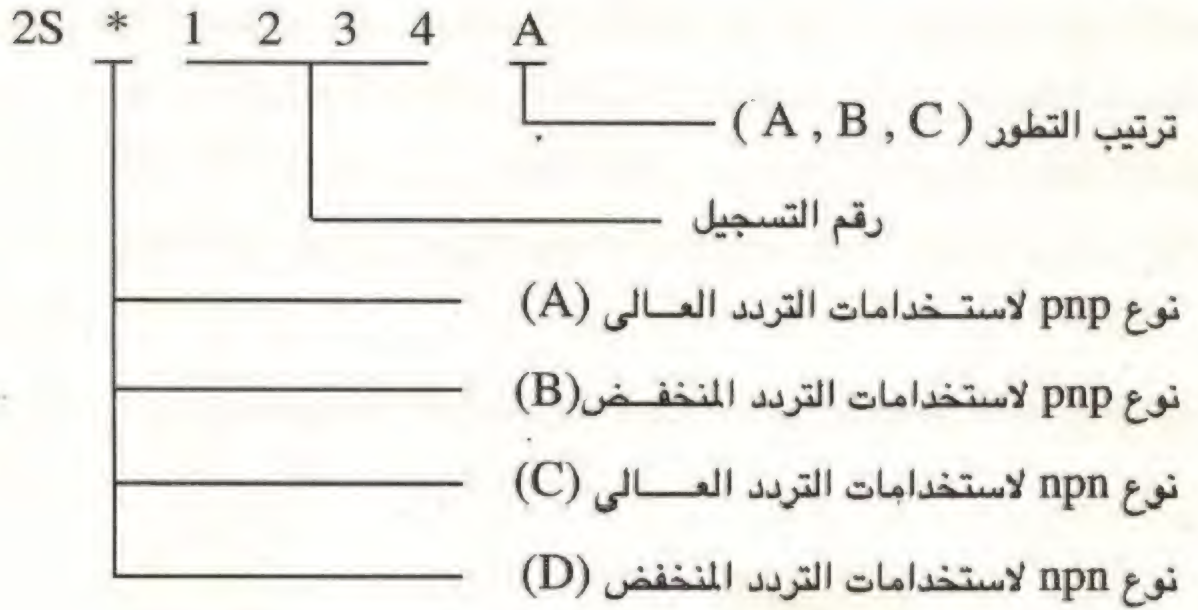
وتيار الباعث I_E هو مجموع تيار القاعدة I_B وتيار المجمع I_C ويمكن التحكم في تيار المجمع الكبير باستخدام تيار القاعدة الصغيرة .



الشكل ٦ - ١٩ مبدأ عمل الترانزستور (قاعدة مشتركة)

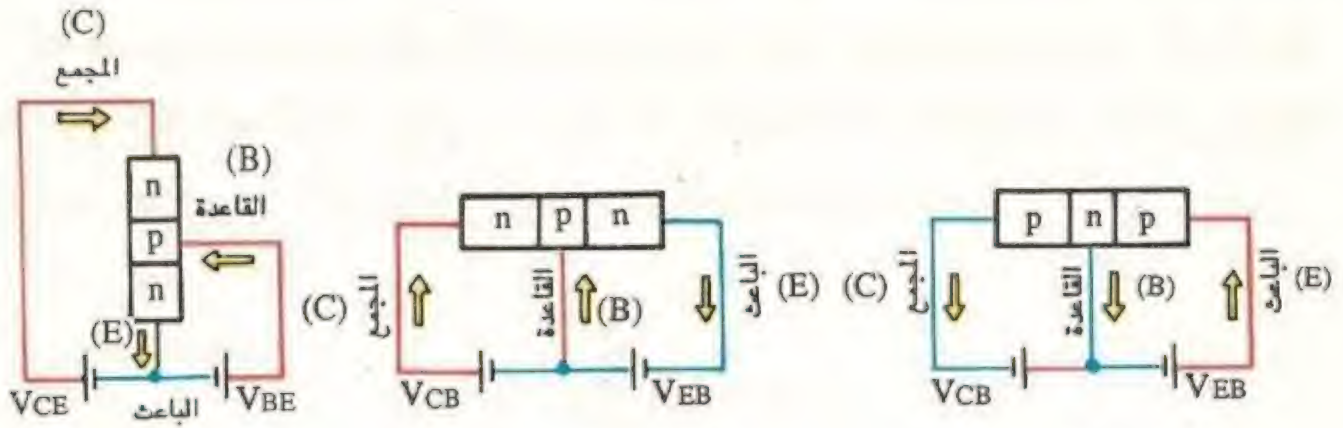
٦ - ٢ - ٢ تسمية وتوصيل الجهود إلى الترانزستور

يمكن تقسيم الترانزستورات إلى : ترانزستورات نوع pnp وترانزستورات نوع npn وترانزستورات تردد عالٍ وترانزستورات تردد منخفض . وطريقة تسمية الترانزستورات كمايلي:



١- توصيل الجهود

يعمل الترانزستور عند تسليط جهود مستمرة معينة، وتسمى هذه الجهود المستمرة (DC) جهود الانحياز . وكما يبين الشكل ٦ - ٢٠ نقوم بتوصيل جهد انحياز أمامي بين القاعدة والباعث ، وتوصيل جهد انحياز عكسي بين القاعدة والمجمع .



(i) نوع pnp (قاعدة مشتركة) (ب) نوع npn (قاعدة مشتركة) (ج) نوع npn (باعث مشترك)

الشكل ٦ - ٢٠ توصيل جهود الانحياز إلى الترانزستور .

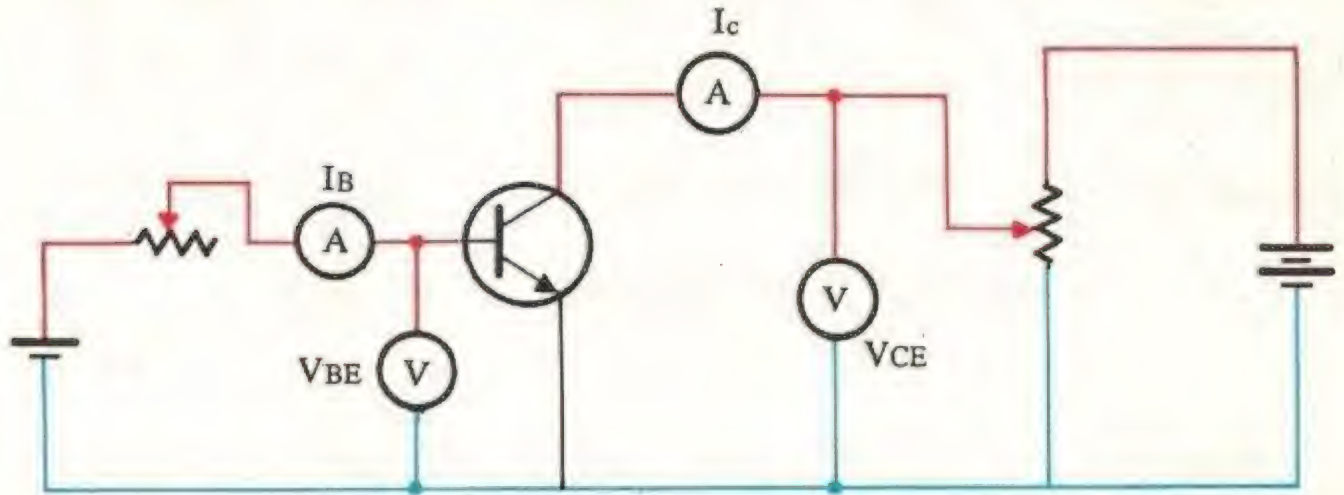
يمكن تقسيم دوائر الترانزستور إلى النوعين الآتين قاعدة مشتركة كما في «الشكل ٦ - ٢٠ (أ) والشكل ٦ - ٢٠ (ب)» وباعث مشترك «الشكل ٦ - ٢٠ (ج)» وذلك طبقاً للطرف المشترك بين دائرتي الدخل والخرج .

٦ - ٢ - ٣ الخواص الاستاتيكية ومعامل h (h parameter)

أ- الخواص الاستاتيكية للترانزستور

يبين الشكل ٦ - ٢٢ المنحنيات التي تعبر عن العلاقة بين الجهود والتيارات في دائرة باعث مشترك موجودة في الشكل ٦ - ٢١ ، وهذه المنحنيات هي الخواص الاستاتيكية لدائرة الباعث المشترك ، والمنحنيات الموجودة في الربع الأول تبين خواص الخرج وهي اعتماد تيار المجمع I_C على جهد المجمع V_{CE} عند قيمة ثابتة لتيار القاعدة I_B . والمنحنى الموجود في الربع الثالث يبين خواص الدخل التي تعبر عن العلاقة بين جهد القاعدة V_{BE} وتيار القاعدة I_B عند ثبات جهد المجمع V_{CE} . وخواص الدخل للترانزستور تشبه خواص الثنائي لأن الخواص بين قاعدة وباعث الترانزستور هي نفسها خواص الثنائي .

أما المنحنى المرسوم في الربع الثاني فيبين اعتماد تيار المجمع I_C على تيار القاعدة I_B عند قيمة ثابتة لجهد المجمع V_{CE} . وميل هذا المنحنى هو النسبة بين تيار الخرج I_C وتيار الدخل I_B ويسمى هذا الميل معامل تكبير التيار h_{fe} وهى قيمة مهمة .



الشكل ٦ - ٢١ دائرة لقياس الخواص الاستاتيكية لترانزستور (باعث مشترك)

والمنحنى المبين في الربع الرابع يبين اعتماد جهد المجمع V_{CE} على جهد القاعدة V_{BE} عند قيمة ثابتة لتيار القاعدة I_B ، ويتم تحليل عملية التكبير باستخدام الخواص الموجودة في الربع الأول وفي الربع الثالث .

ب - معامل h

يمكن معرفة خواص الترانزستور من منحنيات الخواص الاستاتيكية، ولكن يمكن إجراء العمليات الحسابية بسهولة باستخدام معامل h (معامل الهجين)، ومعاملات h هى تعبيرات عديدة عن الخواص . وباستعراض الخواص المبينة بالشكل ٦ - ٢٢ نجد أن معاملات h

للترانزستور هي h_{re} , h_{ie} , h_{fe} , h_{oe} وهى النسب بين التغيرات في كل خاصية .
 واستخدام التغيرات يمكننا من استخدام قيم الخواص التى حصلنا عليها مع الاشارات
 المتغيرة ذات المدى الصغير ونستخدم Δ لنعبر عن مقدار التغير .

الميل h_{oe} عند قيمة معينة لتيار القاعدة I_B في الربع الأول هى النسبة بين التيار والجهد
 في دائرة الخرج ، وتسمى سماحية الخرج وهى مقلوب الممانعة ومعادلتها كالآتى :

$$h_{oe} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} \right)_{I_B = \text{ثابت}} \quad [S]$$

والميل h_{fe} فى الربع الثانى هو معامل تكبير التيار ومعادلته كالآتى :

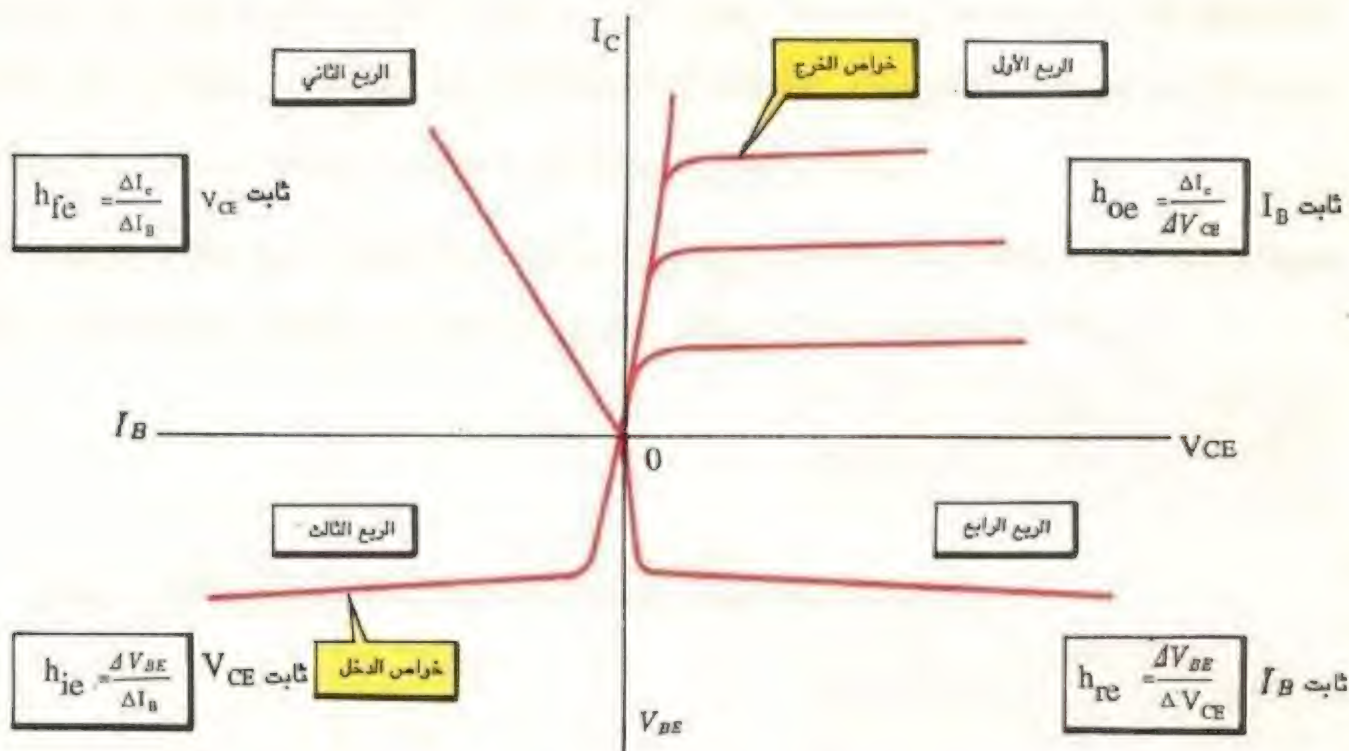
$$h_{fe} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right)_{V_{CE} = \text{ثابت}}$$

الميل h_{ie} فى الربع الثالث هو النسبة بين التغير في الجهد إلى التغير في التيار في دائرة
 الدخل، ويسمى ممانعة الدخل ومعادلته كالآتى :

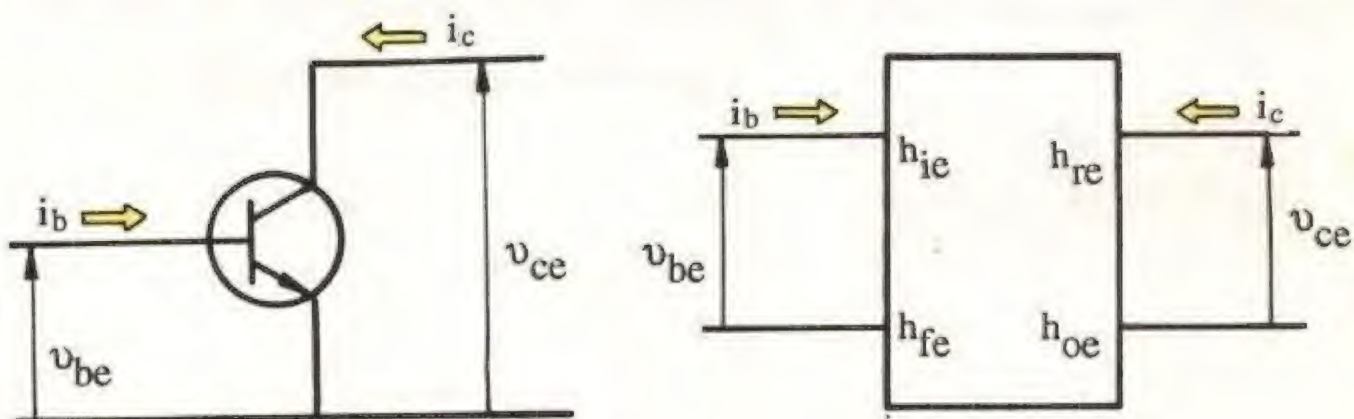
$$h_{ie} = \left(\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} \right)_{V_{CE} = \text{ثابت}} \quad [\Omega]$$

الميل h_{re} فى الربع الرابع هو النسبة بين التغير في جهد دائرة الدخل وجهد دائرة الخرج،
 ويسمى نسبة الرجوع العكسي للجهد ومعادلته هى :

$$h_{re} = \left(\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}} \right)_{I_B = \text{ثابت}}$$



الشكل ٦ - ٢٢ منحنيات الخواص الاستاتيكية لترانزستور (باعث مشترك)



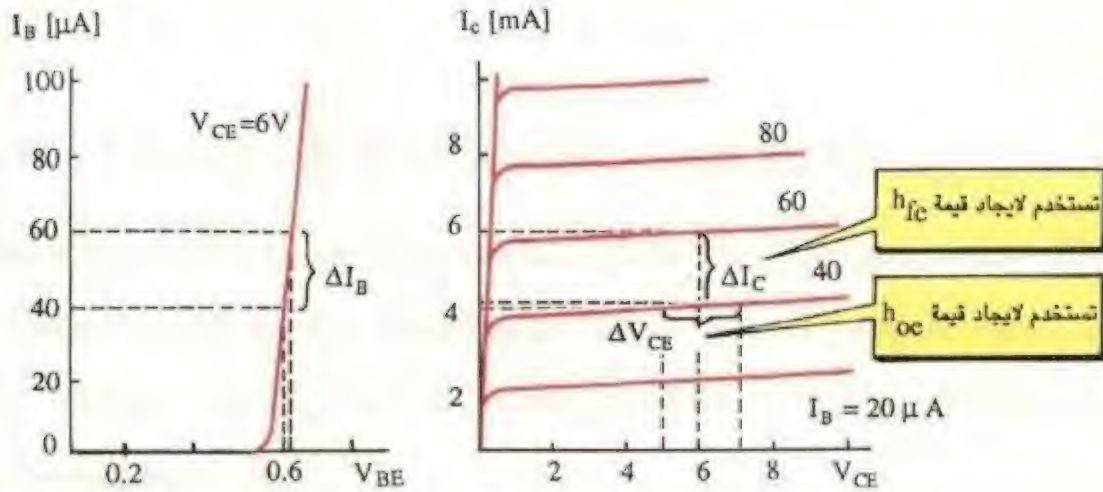
الشكل ٦ - ٢٣ معاملات h للترانزستور

النسبة بين تيار المجمع I_C وتيار القاعدة I_B ($h_{FE} = I_C / I_B$) هي معامل تكبير التيار المستمر (DC) وقيمته تساوي تقريبا قيمة h_{fe} كما في الشكل ٦-٢٢ .

وطبقا للمتغيرات السابق ذكرها يمكننا التعبير عن الترانزستور بمعاملات h داخل صندوق كما في الشكل ٦-٢٣ ومعامل h عند وضع (e) في نهايته يعنى باعث مشترك . وفي حالة القاعدة المشتركة نضع (b) عند نهاية المعامل كما في h_{fb} . ويمكن قياس معاملات h بسهولة ، وهي تستخدم بكثرة في حسابات دوائر الترانزستور .

مثال ١

يبين الشكل ٦-٢٤ منحنيات الدخل والخرج لترانزستور (باعث مشترك) حيث $I_C = 4 \text{ mA}$, $V_{CE} = 6 \text{ V}$.



الشكل ٦-٢٤ منحنيات الدخل والخرج لترانزستور (باعث مشترك)

احسب معاملات h الآتية : h_{oe} , h_{fe} , h_{ie}

الحل

$$h_{ie} = \left(\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} \right)_{V_{CE} = 6V} = \frac{0.6 - 0.58}{(60 - 40) \times 10^{-6}} = 1000 \Omega$$

$$h_{fe} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right)_{V_{CE} = 6V} = \frac{(6 - 4) \times 10^{-3}}{(60 - 40) \times 10^{-6}} = 100$$

$$h_{oe} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} \right)_{I_B = 40 \mu A} = \frac{(4.05 - 3.95) \times 10^{-3}}{7 - 5} = 5 \times 10^{-5} S$$

سؤال ٦

في الشكل ٦ - ٢٤ احسب معاملات h الآتية h_{oe} , h_{fe} إذا كان $I = 2 \text{ mA}$, $V = 5 \text{ V}$.

٦ - ٢ - ٤ الدائرة المكافئة Equivalent circuit للترانزستور

باستخدام الربع الثالث والربع الرابع للخواص الاستاتيكية للترانزستور يمكننا كتابة العلاقة بين جهد القاعدة وبين كل من تيار القاعدة وجهد المجمع. وهذه العلاقة تمثل الإشارات المتغيرة ذات المدى الصغير، ومن الآن فصاعداً سنعتبر عن الإشارة ذات المدى الصغير باستخدام الحروف الصغيرة بدون Δ .

$$v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \quad (6-2)$$

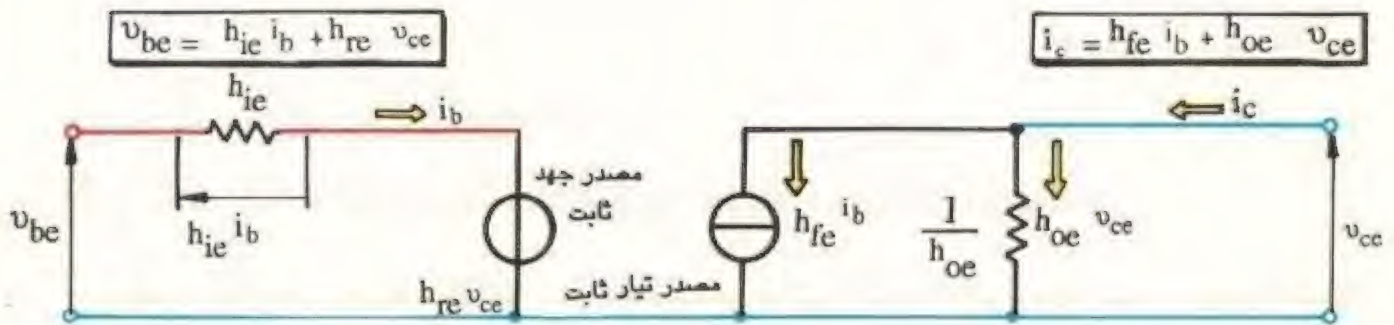
وهذه المعادلة قمنا بتمثيلها في الجانب الأيسر من الشكل ٦ - ٢٥، وتبين المعادلة أن v_{be} هو مجموع فرق الجهد $h_{ie} i_b$ (الناشئ عن ممانعة الدخل) ومصدر الجهد $h_{re} v_{ce}$.

ورمز مصدر الجهد كما في الشكل عبارة عن دائرة بها خط رأسى مع افتراض أن القوة الدافعة الكهربائية المتغيرة موجودة عند موقع الرمز .

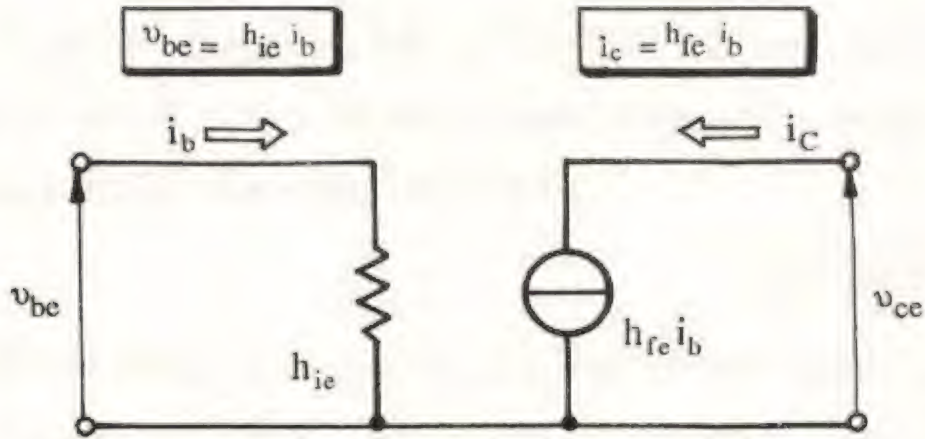
وباستخدام الربع الأول والربع الثانى للخواص الاستاتيكية للترانزستور يمكننا كتابة العلاقة بين تيار المجمع i_c وبين كل من تيار القاعدة i_b وجهد المجمع v_{ce} . عند وجود إشارة ذات سعة موجة صغيرة فإن تيار المجمع تكون معادلته كالتالى :

$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \quad (6-3)$$

وهذه المعادلة قمنا بتمثيلها في الجانب الأيمن من الشكل ٦-٢٥ ، والرمز $(h_{fe} i_b)$ فى الشكل يعبر عن مصدر تيار ونفترض وجود هذا المصدر في موقع الرمز في الشكل . أما $(h_{oe} v_{ce})$ فهو التيار المار خلال سماحية الخرج (h_{oe}) الناتج عن الجهد (v_{ce}) . وكما يبين الشكل ٦-٢٥ فإن الدائرة المكافئة للترانزستور تعبر عن الترانزستور باستخدام مصدر جهد ومصدر تيار وممانعة وسماحية ، وهى تستخدم في تصميم وتحليل دوائر التكبير .



الشكل ٦-٢٥ الدائرة المكافئة للترانزستور



الشكل ٦ - ٢٦ الدائرة المكافئة المبسطة

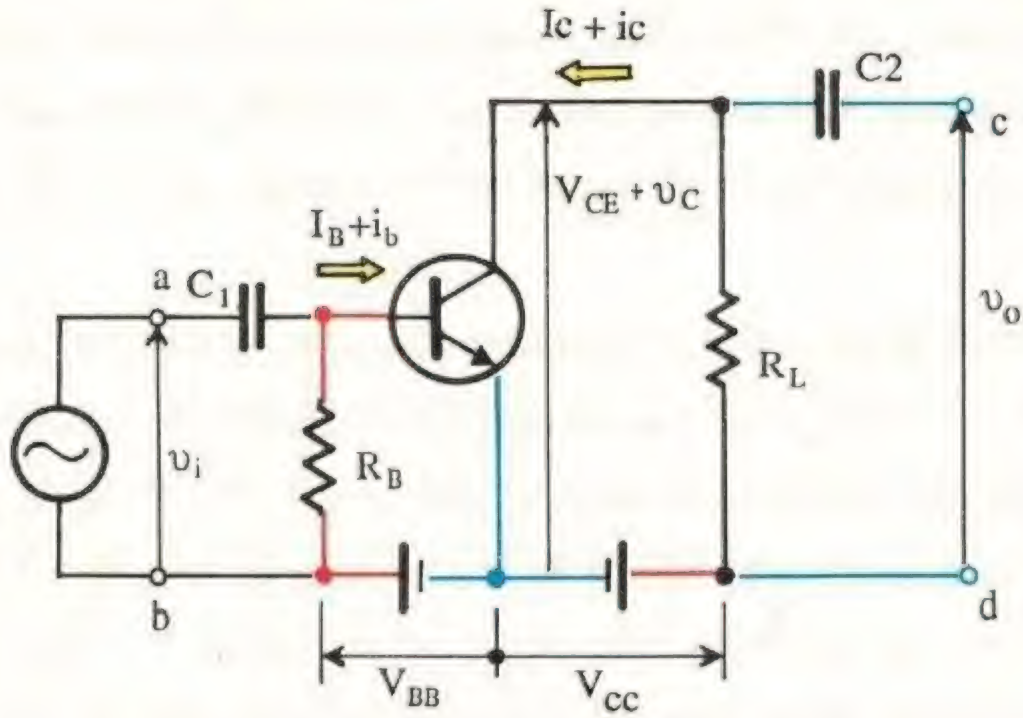
وعملياً فإن قيم h_{oe} , h_{re} تهمل عادة لأنها صغيرة ، وعلى هذا تستخدم الدائرة المكافئة المبينة في الشكل ٦ - ٢٦ . وهذه تسمى بالدائرة المكافئة المبسطة .

٦ - ٣ دائرة الترانزستور

٦ - ٣ - ١ أساسيات دائرة التكبير Amplification circuit

يستخدم التكبير لتحويل إشارة كهربائية صغيرة إلى إشارة كهربائية أكبر . ويبين الشكل ٦-٢٧ دائرة تكبير أساسية تستخدم ترانزستور . ويتطلب عمل دائرة تكبير الترانزستور مصدر قدرة مستمر (DC) للقاعدة V_{BB} ومقاومة قاعدة R_B لإمرار تيار القاعدة المناسب I_B بالإضافة إلى مصدر قدرة مستمر (DC) للمجمع V_{CC} ومقاومة حمل R_L لإمرار تيار المجمع المناسب I_C .

والعمل الأساسي لمقاومة الحمل R_L هو الحصول على جهد الخرج المتغير. وتستخدم مكثفات الازدواج C_1, C_2 لمنع مرور التيار المستمر والسماح بمرور إشارة التيار المتغير فقط



الشكل ٦ - ٢٧ الدائرة الأساسية للمكبر

المعادلات الخاصة بدائرة المجمع هي كالآتي :

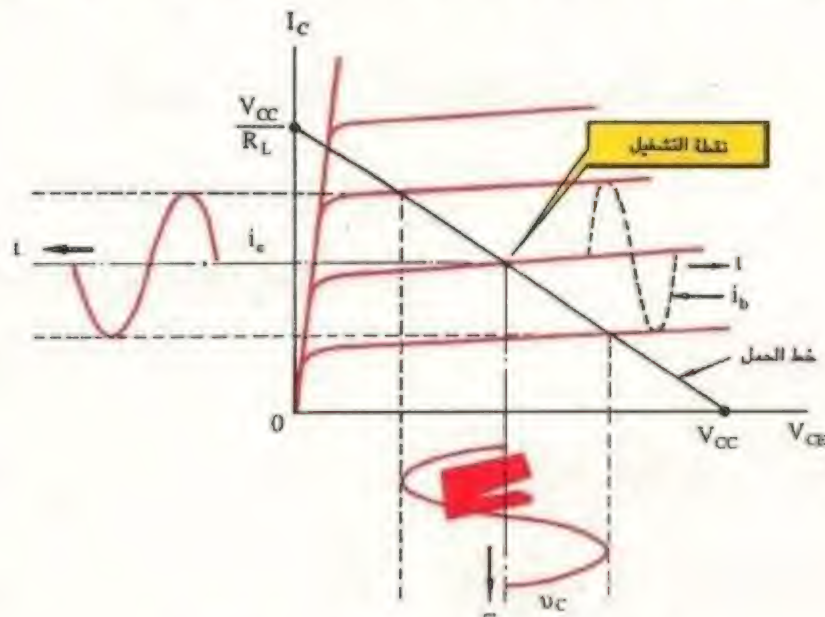
$$V_{CC} = V_{CE} + I_C R_L \quad (6-4)$$

$$I_C = V_{CC} / R_L \quad (V_{CE} = 0) \quad (6-5)$$

$$V_{CE} = V_{CC} \quad (I_C = 0) \quad (6-6)$$

أما الشكل ٦-٢٨ فيبين خط مستقيم يصل بين نقطتي المعادلتين (6-5)، (6-6) على منحنى الخواص الاستاتيكية للترانزستور ، وهذا الخط يسمى «خط الحمل» ويقع عليه جهد وتيار الترانزستور . ونقطة تقاطع خط الحمل مع أحد منحنيات الربع الأول {التي تمثل قيمة معينة لتيار القاعدة I_B (والذي يتحدد بقيمة V_{BE} , R_B)} تسمى نقطة التشغيل، وهي تمثل الجهد والتيار في الترانزستور عند عدم وجود إشارة متغيرة . وعند توصيل إشارة متغيرة إلى القاعدة يتغير جهد وتيار القاعدة على خط الحمل بحيث يكون مركزه عند نقطة التشغيل .

عند توصيل إشارة متغيرة v_i إلى أطراف الدخل (a) ، (b) في الشكل ٦-٢٧ يظهر تيار قاعدة متغير i_b له زاوية طور إشارة الدخل نفسها كما في الشكل ٦-٢٨ . وتعتبر المنحنيات في الشكل ٦-٢٨ عن تيار المجمع i_c وجهد المجمع v_c طبقاً لتغير تيار القاعدة . وفي الشكل ٦-٢٨ نجد أن تيار القاعدة i_b له زاوية الطور نفسها مثل جهد الدخل v_i أي إنه عند زيادة v_i يزيد i_b مما يؤدي إلى نقص قيمة جهد الخرج v_o وعند نقص v_i يزيد v_o . ولهذا فإننا نجد أن هناك فرق طور قيمته 180 درجة بين جهد الدخل وجهد الخرج



الشكل ٦-٢٨ نظرية عمل المكبر

٦ - ٣ - ٢ درجة التكبير والكسب

١ - درجة التكبير Amplification degree

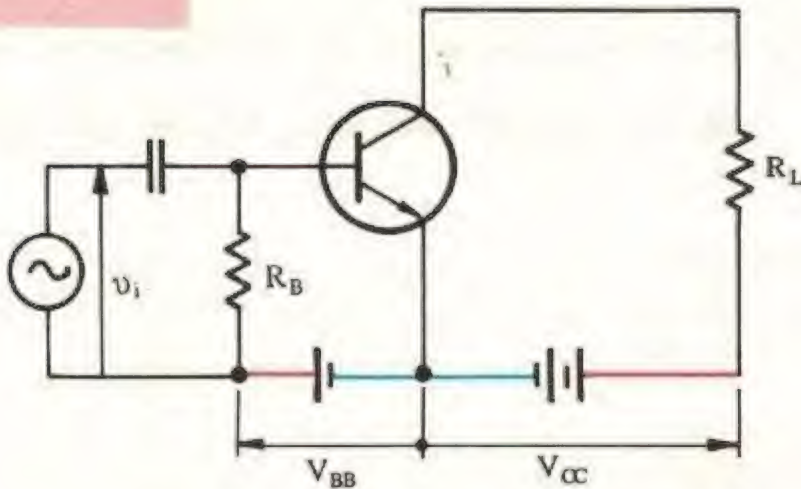
يمكن تحويل دائرة التكبير بالشكل ٦ - ٢٩ إلى الشكل ٦ - ٣٠ باستخدام الدائرة المكافئة المبينة في الشكل ٦ - ٢٦ ، ويمكن إهمال المقاومة R_B لأنها كبيرة جداً بالنسبة إلى h_{ie} . ونفترض أن مفاعلة المكثف C صغيرة بدرجة تكفي لإهمالها عند تردد إشارة الدخل v_i . فإذا افترضنا أن جهود الدخل والخرج هي v_i , v_o على الترتيب فإن العلاقات بينها تكون كما يلي :

$$i_b = \frac{v_i}{h_{ie}} \quad (6-7)$$

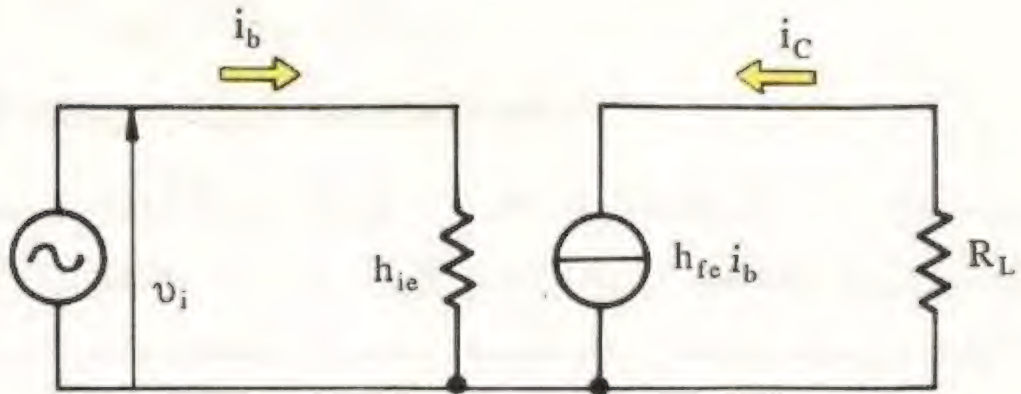
$$v_o = -i_c R_L = -h_{fe} i_b R_L = -h_{fe} \left(\frac{v_i}{h_{ie}} \right) R_L \quad (6-8)$$

وفي المعادلة (٦ - ٨) توجد إشارة سالبة لوجود فرق طور 180 درجة بين جهد الخرج وجهد الدخل . ونسبة جهد الخرج إلى جهد الدخل تسمى درجة التكبير . ومن المعادلة نفسها يمكن استنتاج درجة تكبير الجهد في المعادلة التالية :

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_L \quad (6-9)$$



الشكل ٦ - ٢٩ دائرة تكبير جهد



الشكل ٦ - ٣٠ الدائرة المكافئة لمكبر الجهد

مثال ٢

احسب درجة تكبير الجهد للدائرة بالشكل ٦ - ٢٩ . حيث معاملات h هي

$$R_L = 6 \text{ k } \Omega \text{ ومقاومة الحمل هي } h_{ie} = 4 \text{ k } \Omega , h_{fe} = 200$$

الحل

بتعويض القيم السابقة في المعادلة (٩ - ٦) نحصل على القيمة الآتية :

$$A_v = - \frac{h_{fe}}{h_{ie}} \times R_L = \frac{200}{4000} \times 6000 = 300$$

ويمكن حساب درجة تكبير التيار A_i ودرجة تكبير القدرة A_p كما يلي :

$$A_i = \frac{\text{تيار الخرج}}{\text{تيار الدخل}}$$

$$A_i = \frac{h_{fe} i_b}{i_b} = h_{fe}$$

(١٠ - ٦)

$$A_p = \frac{\text{قدرة الخرج}}{\text{قدرة الدخل}}$$

$$A_p = \frac{v_o i_c}{v_i i_b} = \frac{h_{fe}^2}{h_{ie}} R_L \quad (6-11)$$

ب - الكسب Gain

عند حساب درجة التكبير نجد أنها تكون عدداً كبيراً . وبدلاً من هذا العدد الكبير نستخدم لوغاريتم هذا العدد مضروباً في 10 أو في 20 . وهذه القيمة تسمى الكسب G ووحدة قياسها الديسيبل ويرمز لها بالرمز (dB) . وتستخدم المعادلات الآتية لحساب كسب الجهد، وكسب التيار، وكسب القدرة :

$$\text{كسب الجهد} \quad G_v = 20 \log_{10} A_v [dB] \quad (6-12)$$

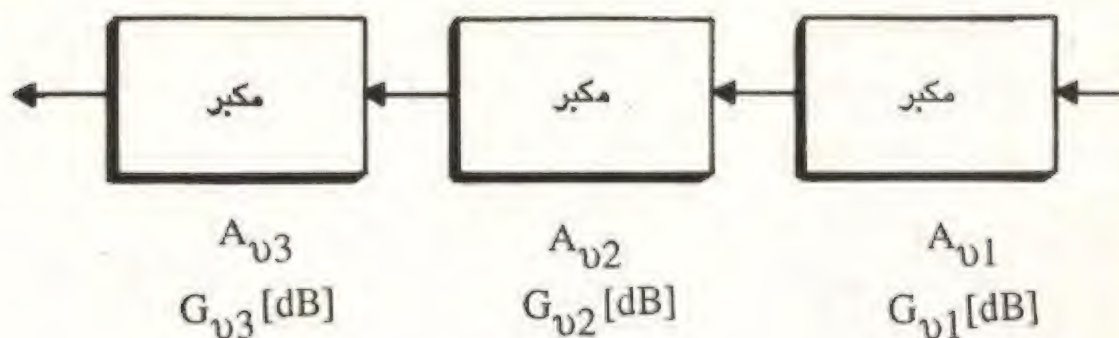
$$\text{كسب التيار} \quad G_i = 20 \log_{10} A_i [dB'] \quad (6-13)$$

$$\text{كسب القدرة} \quad G_p = 10 \log_{10} A_p [dB] \quad (6-14)$$

ح - درجة التكبير والكسب في المكبر متعدد المراحل

Multi-stage amplification circuit

يبين الشكل ٦ - ٣١ توصيل عدد من مراحل التكبير معاً للحصول على درجة التكبير المطلوبة . وفي هذا التوصيل تكون درجة التكبير الكلية للجهد هي حاصل ضرب درجة تكبير كل مرحلة .



الشكل ٦ - ٣١ المكبر متعدد المراحل

الكسب الكلي للجهد هو مجموع كسب جهد كل مرحلة . وتحسب درجة تكبير التيار والقدرة والكسب بالطريقة نفسها . ومن الشكل ٦ - ٣١ نجد أن المعادلات الخاصة بدرجة التكبير الكلية للجهد A_{v0} والكسب الكلي للجهد G_{v0} هي كالآتي :

$$A_{v0} = A_{v1} \cdot A_{v2} \cdot A_{v3} \quad (6 - 15)$$

$$\begin{aligned} G_{v0} &= 20 \log_{10} (A_{v1} \cdot A_{v2} \cdot A_{v3}) = 20 \log_{10} A_{v1} + 20 \log_{10} A_{v2} + 20 \log_{10} A_{v3} \\ &= G_{v1} + G_{v2} + G_{v3} \quad (dB) \end{aligned} \quad (6 - 16)$$

سؤال ٧

في الدائرة المبينة بالشكل ٦ - ٢٩ ذات المعاملات الآتية :

$$h_{fe} = 150, \quad h_{ie} = 3 \text{ k } \Omega, \quad R = 5 \text{ k } \Omega$$

احسب درجة تكبير الجهد A_v وكسب الجهد G_v

* فى كسب الجهد مثلاً بعد حساب لوغاريتم نسبة جهد الخرج إلى جهد الدخل تكون وحدة قياس هذه الكمية هي (dB) . وتستخدم هذه الطريقة أيضاً عند حساب الضغط الصوتى وخرج الصوت باستعمال لوغاريتم نسبة المستوى إلى قيمة قياسية .

٦ - ٣ - ٣ دائرة التكبير ذات التغذية الراجعة للتيار

Current Feedback

تحتاج الدائرة الأساسية للترانزستور إلى مصدري قدرة مستمر (DC) ويعدّ ذلك غير ملائم للاستخدام العملى فى الأدوات الالكترونية . ويبين الشكل ٦ - ٣٢ دائرة تستخدم مصدر قدرة مفرد . وفى الدائرة المبينة بالشكل ٦ - ٣٩ عند ارتفاع درجة الحرارة يزداد تيار المجمع فتحدث سخونة شديدة للترانزستور وقد يحدث انهيار للترانزستور ، وتسمى هذه الظاهرة الهروب الحرارى . والدائرة المبينة فى الشكل ٦ - ٣٢ تعطى تكبيراً ثابتاً حتى مع ارتفاع درجة الحرارة ، وهذه الدائرة تسمى المكبر ذا التغذية الراجعة للتيار . والوظائف التي يؤديها كل من المقاومات والمكثفات بدائرة الشكل ٦ - ٣٢ نشرحها كما يلي :

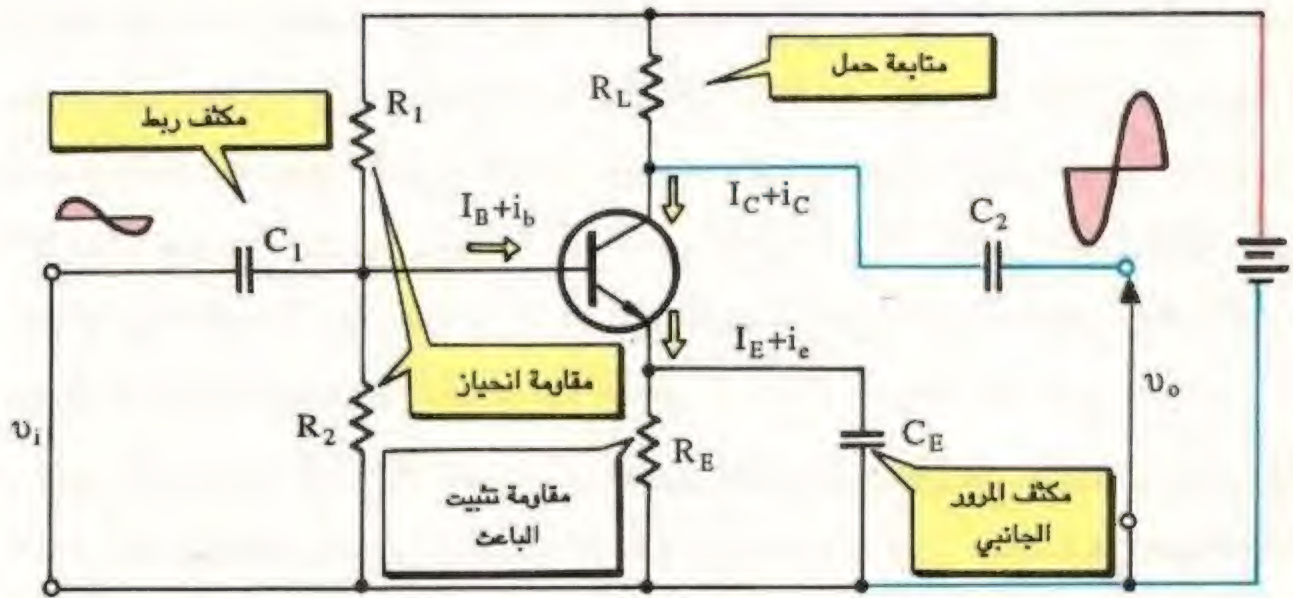
تقوم المقاومات R_1 , R_2 بتقسيم جهد مصدر القدرة للحصول على الجهد المناسب للقاعدة لأمرار تيار القاعدة . وتسمى R_1 , R_2 مقاومات الانحياز وتيار القاعدة فى هذه الحالة هو تيار الانحياز .

تمنع المقاومة R_E زيادة تيار المجمع عند ارتفاع درجة الحرارة المحيطة ، وتسمى المقاومة R_E مقاومة الباعث التثبيتية . وعند ارتفاع درجة الحرارة يزداد تيار المجمع فى الترانزستور وتؤدي هذه الزيادة إلى زيادة تيار الباعث وزيادة الجهد على المقاومة R_E ، وتكون النتيجة نقص الجهد بين القاعدة والباعث مما يؤدي إلى إنقاص تيار المجمع ، وفى آخر الأمر نجد أن تيار المجمع لايزيد حتى عند ارتفاع درجة الحرارة المحيطة .

أما المكثفات C_1 , C_2 فتسمى مكثفات الإزدواج ، وتمنع مرور التيار المستمر (DC) وتسمح بمرور التيار المتغير، وتستخدم للإزدواج بين الدوائر .

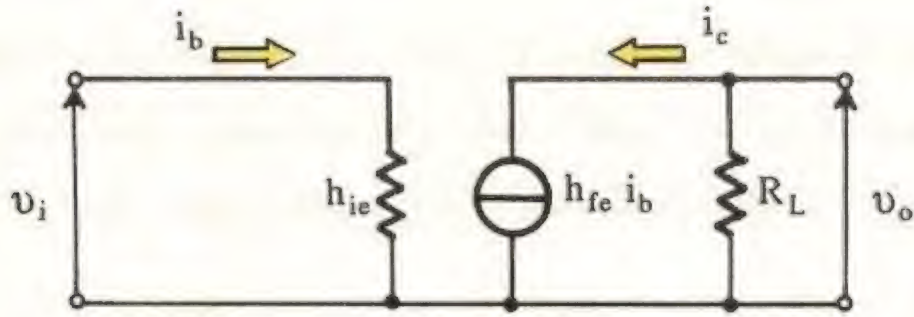
المكثف C_E يسمى مكثف المرور الجانبي ، ويسمح للإشارة المتغيرة بالمرور خلاله حتى لا يقل تيار الإشارة المتغيرة نتيجة مروره في المقاومة R_E .

والمقاومة R_L هي مقاومة الحمل ، ويظهر عليها جهد الخرج . وعند الترددات المنخفضة تزيد مفاعلات المكثفات مما يؤدي إلى تدهور أداء مكثفات الأزواج والمرور الجانبي ، وذلك يؤدي إلى نقص درجة التكبير عند الترددات المنخفضة . وإذا أردنا تحسين الخواص عند الترددات المنخفضة يجب استخدام مكثف ذي سعة كبيرة .



الشكل ٦ - ٣٢ المكبر ذو التغذية الراجعة للتيار

ويبين الشكل ٦ - ٣٣ الدائرة المكافئة لدائرة الشكل ٦ - ٣٢ فيما يتعلق بالإشارة المتغيرة . ويمكن إهمال المقاومتين R_1 , R_2 لأن قيمها كبيرة على وجه العموم (عدة عشرات من الكيلو أوم) بالنسبة إلى قيمة h_{ie} (عدد من الكيلو أوم) .

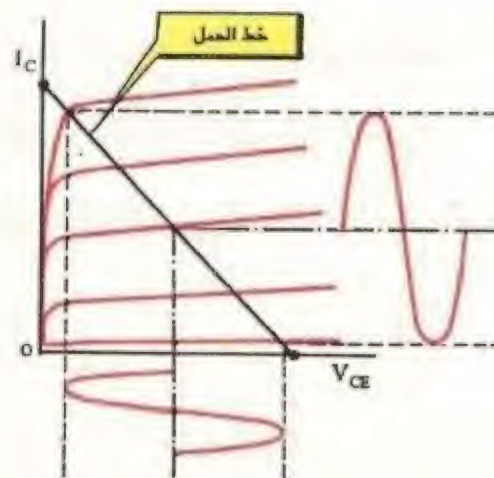


الشكل ٦ - ٣٣ الدائرة المكافئة لدائرة الشكل ٦ - ٣٢

ويمكن حذف كل من C_1 , C_2 لأن مفاعلاتها صغيرة في الحيز الترددي المستخدم .
والمقاومة R_E يوجد عليها قصر ناتج من المفاعلة الصغيرة للمكثف C_E .

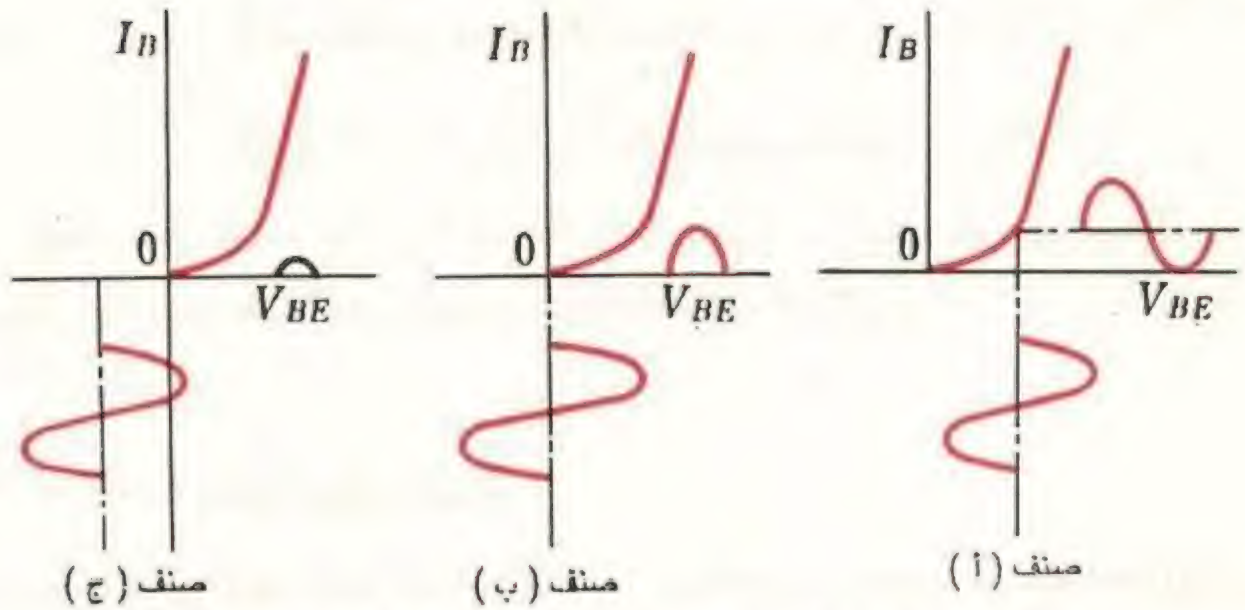
٦ - ٣ - ٤ دائرة مكبر القدرة

في دائرة مكبر الجهد المبينة بالشكل ٦ - ٢٨ يستخدم جزء صغير من خط الحمل وتسمى الدائرة دائرة تكبير الإشارات ذات المدى الصغير . وعلى العكس من ذلك في دائرة مكبر القدرة بالشكل ٦ - ٣٤ فيستخدم تقريبا كل اجزاء خط الحمل ، وتسمى الدائرة دائرة تكبير الإشارات ذات المدى الكبير ، وتستخدم دائرة مكبر القدرة لتغذية الهوائيات (التي تشع الموجات الكهرومغناطيسية) بالقدرة عالية التردد، وتستخدم أيضاً لتغذية دوائر المحركات .



الشكل ٦ - ٣٤ الإشارات في دائرة مكبر القدرة

تصنف المكبرات إلى أصناف (أ) ، (ب) ، (ج) طبقاً لموقع تيار القاعدة أو نقطة التشغيل على خط الحمل . وعند استخدام مكبرات القدرة يعد اختيار صنف المكبر مهما للغرض المستخدم لأجله . ويبين الشكل ٦ - ٣٥ أمثلة لهذه الأصناف .

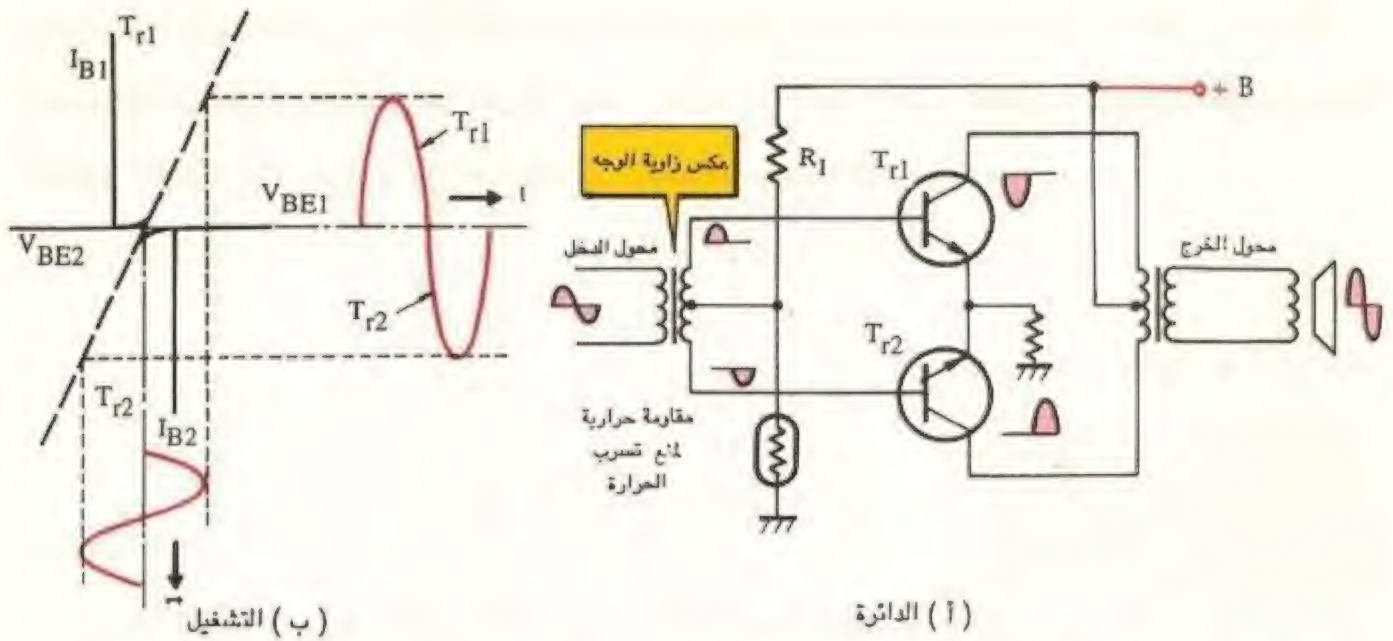


الشكل ٦ - ٣٥ تصنيف المكبرات طبقاً لموقع نقطة التشغيل

في الصنف (أ) لا يحدث أي تشويه أو انحراف ، ويمر التيار حتى في حالة عدم وجود أية إشارة وذلك يؤدي إلى كفاءة قليلة .

وفي الصنف (ب) يظهر عند الخرج نصف الدورة فقط ، وعند استخدام مكبر الجذب والدفع (حيث يعمل 2 ترانزستور بالتناوب) لا يحدث تشويه .

وفي الصنف (ج) يظهر عند الخرج أقل من نصف الدورة ، ويستخدم هذا النوع للدوائر النبضية .



الشكل ٦ - ٣٦ مكبر الجذب والدفع صنف (ب)

ويبين الشكل ٦ - ٣٦ مثلاً لدائرة مكبر الجذب والدفع صنف (ب) المستخدم في جهاز استقبال الإذاعة . وفي الدائرة المبينة بهذا الشكل نحتاج لدائرة عكس زاوية طور إشارة الدخل (بواسطة محول الدخل) لتمكين 2 ترانزستور من العمل بالتناوب . ويرمز لمصدر القدرة المستمر (DC) اللازم لتشغيل الترانزستور بالرمز $(+ B)$ ، وعادة لا يظهر مصدر القدرة في الأشكال التي تبين مبدأً ونظرية عمل الدوائر .

٦ - ٣ - ٥ دائرة المذبذب Oscillation circuit

أ - دائرة التكبير ذات التغذية الراجعة ومبدأ عمل التذبذب

الدائرة التي تقوم بتوليد إشارة التردد العالي لاستخدامها في الاتصال اللاسلكي وقياس وضبط إشارة التيار المتردد تسمى دائرة المذبذب . وتستخدم في عدد من الأدوات الإلكترونية.

وتعتمد دائرة المذبذب . على دائرة المكبر ذي التغذية الراجعة المبينة في الشكل ٦ - ٣٧ . وهذه الدائرة تقوم بالتكبير عن طريق إرجاع جزء من الخرج إلى الدخل . ويمكن حساب درجة التكبير الكلية A_O للدائرة في هذا الشكل باستخدام المعادلة التالية :

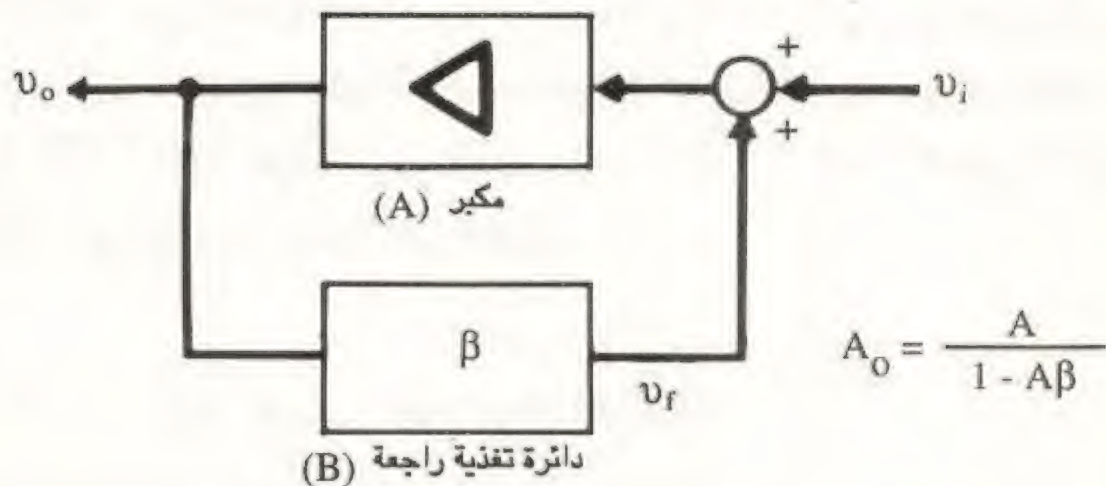
$$v_o = (v_i + v_f) A = (v_i + \beta v_o) A$$

$$v_o (1 - A\beta) = v_i A$$

$$A_O = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A}{1 - A\beta} \quad (6-17)$$

ودرجة تكبير دائرة التكبير (أ) هي A أما نسبة جهد خرج إلى جهد دخل دائرة التغذية الراجعة (ب) فهي $(\beta = V_f / V_o)$.

كسب العروة هو $(A\beta)$ وكمية التغذية الراجعة هي $(1 - A\beta)$.



الشكل ٦ - ٣٧ مكبر ذو تغذية راجعة

في المعادلة (17 - 6) عند $(A\beta = 1)$ نجد أن درجة التكبير الكلية تصبح مالانهاية $(A_0 = \infty)$ ويمثل ذلك حالة التذبذب حيث يتم الحصول على إشارة لها ترددذبذب يتحدد من الشرط $(A\beta = 1)$ حتى بدون وجود إشارة دخل ويسمى الشرط $(A\beta = 1)$ شرط التذبذب .

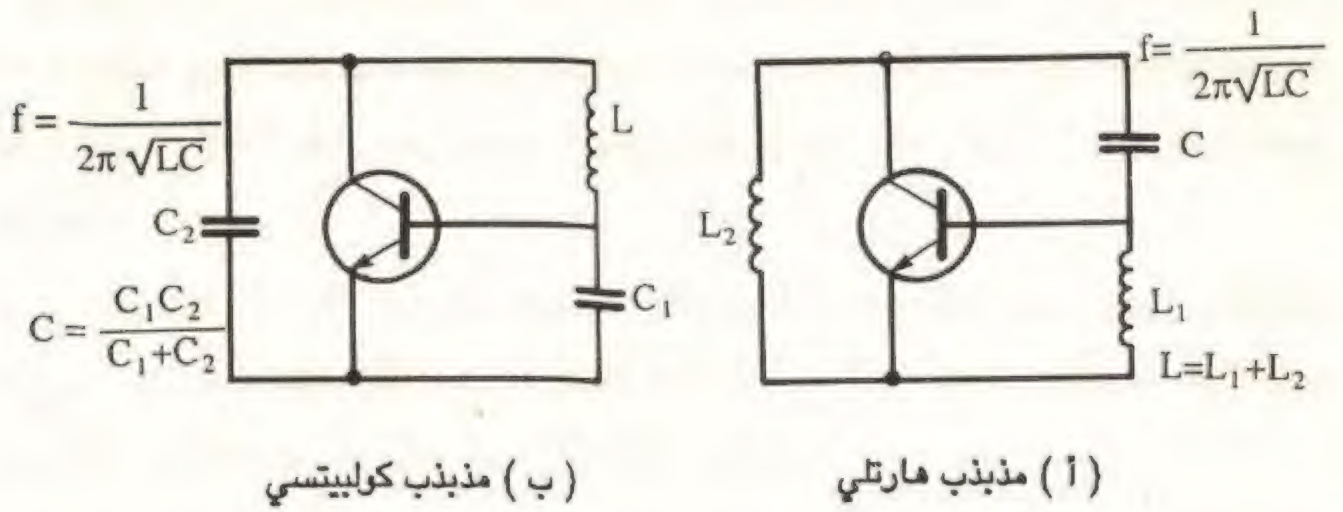
ومن المعادلة (17 - 6) إذا كانت قيمة $(A\beta)$ سالبة يصبح مقام الكسر موجبا ولا يحدث التذبذب . وإذا كانت قيمة $A\beta$ موجبة وتحقق الشرط $A\beta = 1$ يحدث التذبذب . فإذا كانت قيمة (A) سالبة وجب أن تكون قيمة (β) أيضاً سالبة .

إذا كان $(1 - A\beta)$ أكبر من الواحد الصحيح فإن درجة التكبير الكلية (A_0) تكون أقل من درجة التكبير الأصلية (A) ، وتكون الدائرة في هذه الحالة دائرة مكبر ذي تغذية راجعة سالبة . وتستخدم دائرة التغذية الراجعة السالبة كثيراً نظراً لما لها من خواص تردديه محسنة وخواص ضوضاء وتشويه محسنة على الرغم من نقص درجة التكبير .

وعندما يكون $(1 - A\beta)$ أقل من الواحد الصحيح فإن درجة التكبير الكلية A_0 تكون أكبر من درجة التكبير الأصلية A . وتكون الدائرة في هذه الحالة دائرة مكبر ذي تغذية راجعة موجبة . وفي دائرة المذبذب بمجرد تشغيل المفتاح تظهر ذبذبة غير عادية ويحدث لها تكبير ذو تغذية راجعة موجبة ، وبعد مضي وقت قصير تصل الدائرة إلى شرط التذبذب وتكون إشارة الخرج ثابتة .

ب- دائرة مذبذب LC

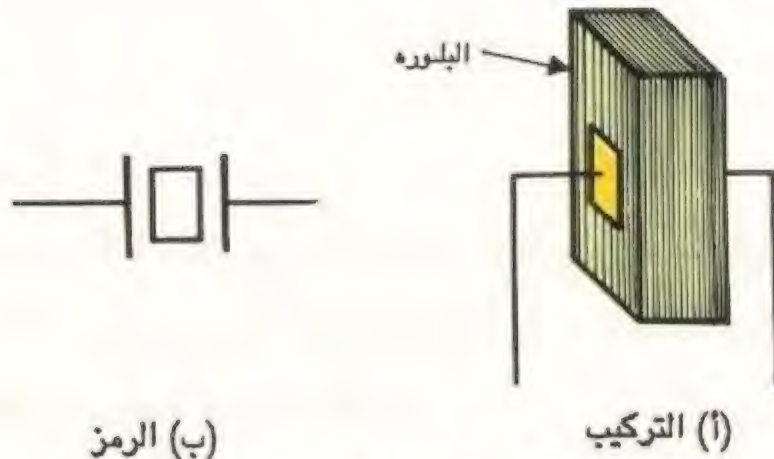
تحتوى دائرة مذبذب LC على ملف L ومكثف C لتحقيق شرط التذبذب $(A\beta = 1)$. ويبين الشكل ٦ - ٣٨ دوائر مذبذب LC الأساسية وقيمة تردد الذبذبة (f) . وبتغير قيم L , C يمكن الحصول على قيمة التردد المطلوبة .



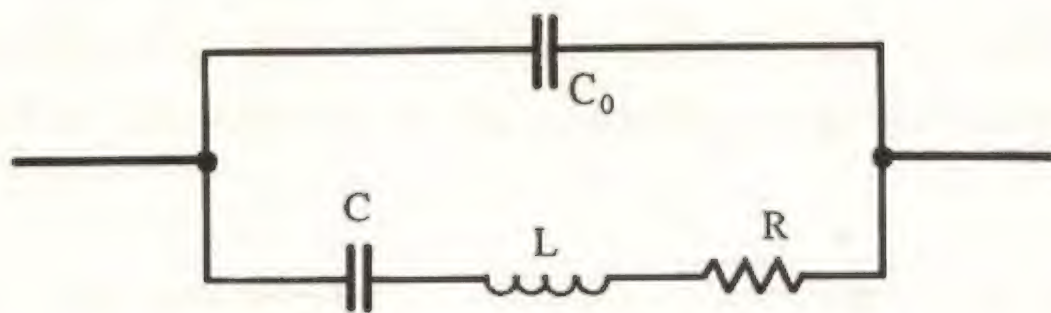
الشكل ٦ - ٣٨ مذبذبات LC

ج- دائرة مذبذب البلورة

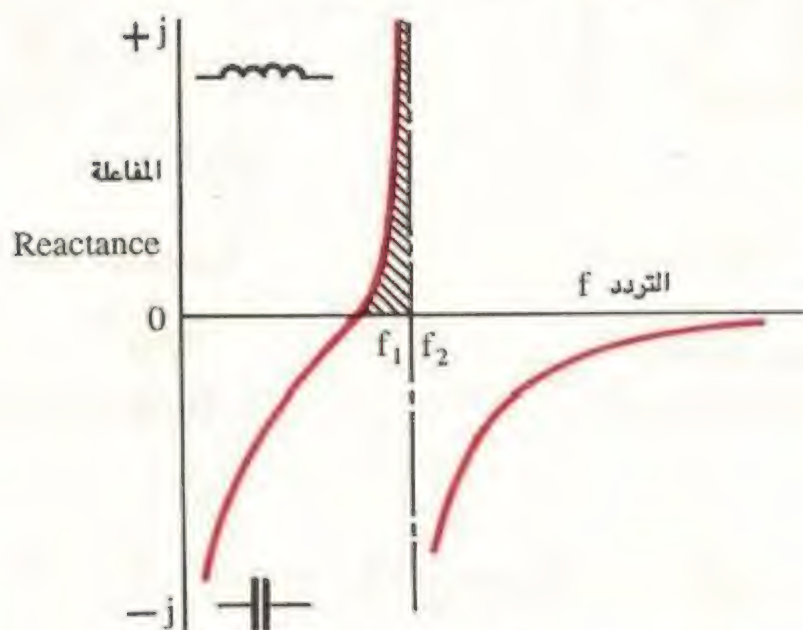
يمكن لبلورة الكوارتز أن تغير من شكلها إذا وصل إليها جهد معين ، ويكون تغير الشكل أكبر ما يمكن عند تردد معين مما يدل على وجود رنين . ومذبذب البلورة يتكون من قطعة بلورية في شكل مستطيل ومثبتة بأقطاب لإمكانية استخدام خواص الرنين . ويبين الشكل ٦ - ٣٩ (ب) رمز البلورة .



الشكل ٦ - ٣٩ بلورة الرنين



الشكل ٦ - ٤٠ الدائرة المكافئة للبلورة

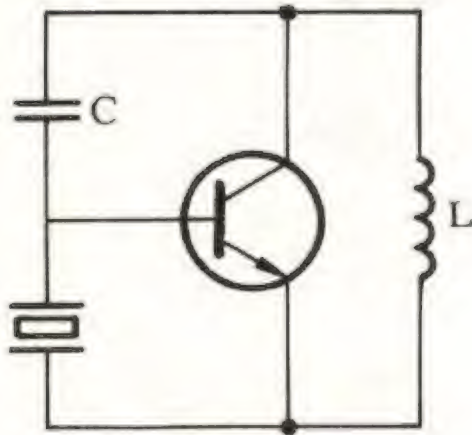


الشكل ٦ - ٤١ الخواص الترددية للبلورة

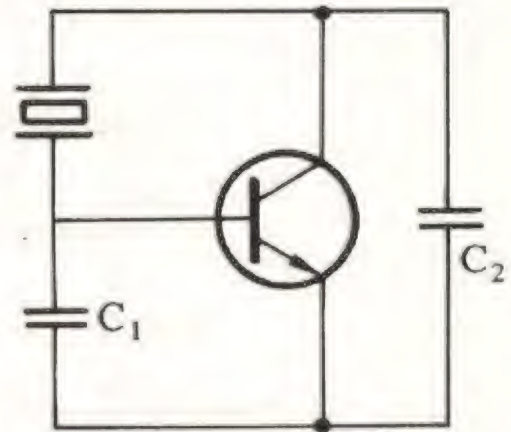
ويبين الشكل ٦ - ٤٠ الدائرة المكافئة للبلورة. أما الشكل ٦ - ٤١ فيبين الخواص الترددية لهذه الدائرة ويظهر منها أن البلورة تعمل كمكثف في الحيز الترددي من صفر إلى (f_1) وتعمل كمكثف في الحيز الترددي من (f_1) إلى (f_2) ثم تعمل كمكثف عند الترددات الأعلى من (f_2) .

والحيز الترددي الذي تعمل فيه البلورة كمكثف ضيق جداً ، وله ثبات كبير بالنسبة لتغيرات درجة الحرارة إذا كانت البلورة مقطوعة بطريقة دقيقة صحيحة . وتستخدم دائرة مذبذب

البلورة هذه الخاصية في دائرة مذبذب LC . ومذبذب البلورة له درجة ثبات ممتازة بالنسبة لتردد الذبذبة مع درجة الحرارة ، ويستخدم في مذبذبات التوقيت والمذبذبات القياسية .



(ب) مذبذب بيرس BE
(البلورة بين القاعدة والباعث)



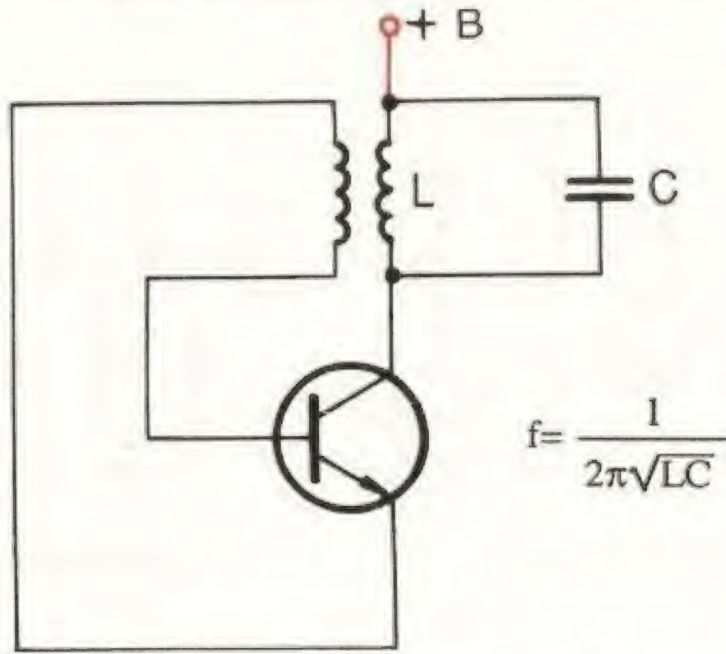
(i) مذبذب بيرس CB
(البلورة بين المجمع والقاعدة)

الشكل ٦ - ٤٢ الدائرة الأساسية لمذبذبات البلورة

ويبين الشكل ٦ - ٤٢ دوائر المذبذبات البلورية حيث تشمل الدائرة ترانزستور وبلورة بجانب العناصر الأخرى .

د - مذبذب الازدواج الخلفي Back coupling ومذبذب المقاومة والمكثف

يستخدم مذبذب الازدواج الخلفي محولاً يقوم بعملية تغذية راجعة لجزء من جهد الخرج إلى الدخل . ويقوم المحول بإجراء عملية عكس زاوية الطور بكل سهولة . ويبين الشكل ٦ - ٤٣ دائرة مذبذب المجمع المتوالف .

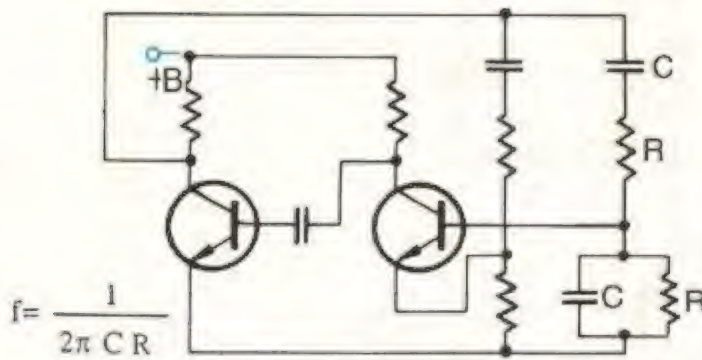


الشكل ٦ - ٤٣ مذبذب المجمع المتوالف

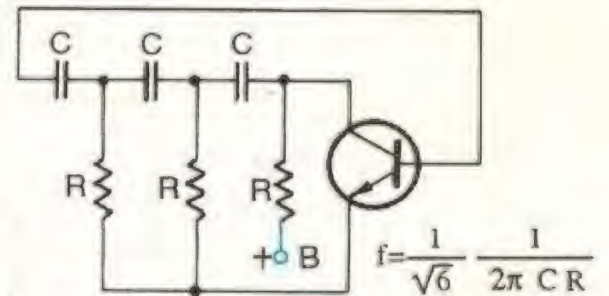
Tuned collector oscillation circuit

في دوائر مذبذب المقاومة والمكثف (التي تحتوي على نوع إزاحة الطور ونوع القنطرة) يتم تغيير زاوية الطور باستخدام المقاومات والمكثفات. وبين الشكل ٦-٤٤ الدوائر الأساسية لهذه المذبذبات، ويستخدم مذبذب المقاومة والمكثف للحصول على مذبذبات ذات ترددات منخفضة.

يستخدم المذبذب من نوع إزاحة الطور في دوائر المذبذبة ثابتة التردد؛ أما المذبذب من نوع القنطرة فيستخدم للحصول على الترددات المنخفضة المتغيرة لأن التردد يتغير على نطاق واسع عند تغيير قيمة R ، C .



(ب) مذبذب القنطرة



(أ) مذبذب إزاحة الوجه (الطور)

الشكل ٦ - ٤٤ مذبذبات المقاومة والمكثف

٦ - ٤ العناصر المختلفة المصنوعة من أشباه الموصلات

٦ - ٤ - ١ الأنواع المختلفة من الثنائيات

هناك أنواع كثيرة للثنائيات لها إستخدامات أخرى غير تقويم التيار المتغير (التردد). في هذا الجزء سنقوم بدراسة خواص واستخدام عدد من الثنائيات .

أ - ثنائي منظم الجهد Voltage regulation diode

كما هو معروف فإن الزيادة التدريجية للجهد العكسي على الثنائي تؤدي إلى ظاهرة الانهيار . وتنشأ هذه الظاهرة لأن الحاملات تتحرك بعجلة تزايدية في الاتجاه العكسي وتنفصل الإلكترونات من المدارات الخارجية وتكون مزيداً من الحاملات بصورة مستمرة .

وثنائيات منظم الجهد لها خواص تعمل على تنظيم الجهد ضد الجهد العكسي، وتستخدم عادة للحصول على جهد قياسي في دوائر تنظيم جهد مصدر القدرة المستمر (DC) . ويبين الشكل ٦ - ٤٥ المظهر الخارجى ورمز ثنائي منظم الجهد .



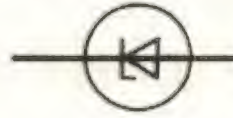
(ج) الثنائي الباعث للضوء
نو السبعة أقسام



(ب) الرمز



(أ) المظهر الخارجي



(ب) الرمز



(أ) المظهر الخارجي

الشكل ٦ - ٤٦ ثنائي باعث الضوء

الشكل ٦ - ٤٥ ثنائي منظم الجهد

ب- الثنائي الباعث للضوء (LED) Light Emission Diode

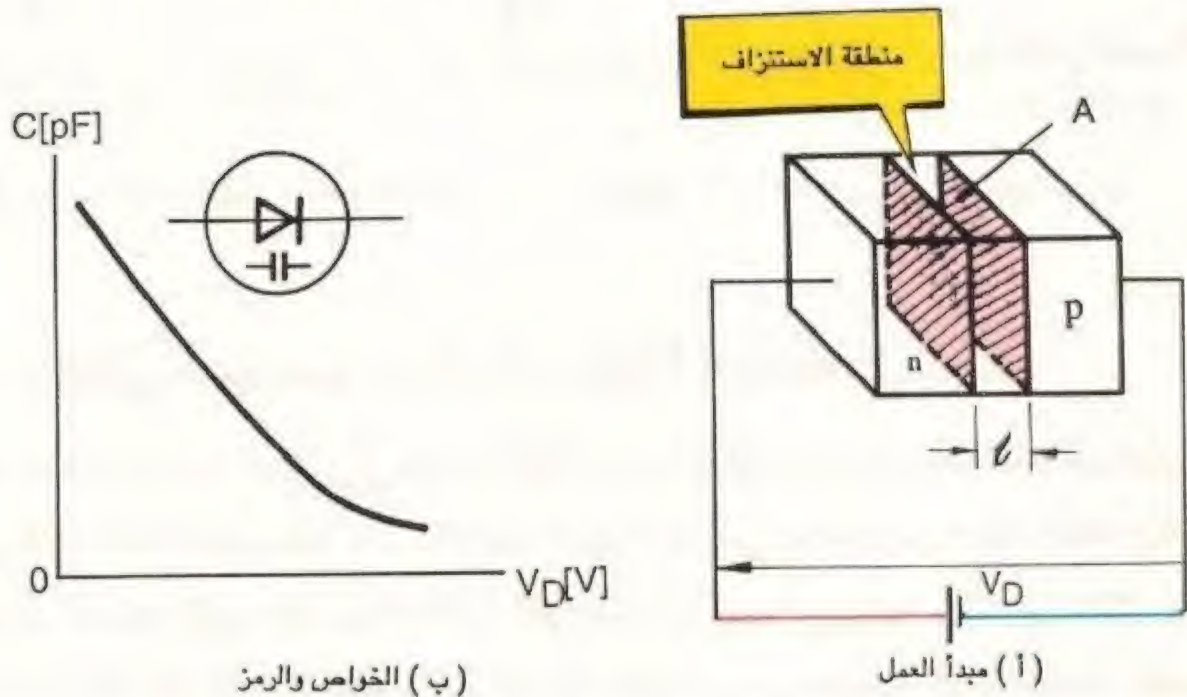
عند توصيل جهد أمامي إلى وصلة pn تتحرك الإلكترونات من مدار طاقة منخفضة إلى مدار طاقة عالية بحصولها على طاقة من الجهد الأمامي ، وعند رجوع هذه الإلكترونات إلى المدارات الأصلية تقوم بتفريغ الطاقة (التي حصلت عليها من ذي قبل) في شكل ضوء . وتستخدم الثنائيات الباعثة للضوء التي لها هذه الخواص في المبينات (أو الشاشات الصغيرة) المختلفة .

والثنائي الباعث للضوء ذو الأقسام السبعة المبين في الشكل ٦ - ٤٦ (ج) يستخدم لبيان الأرقام من صفر إلى 9 .

ح- ثنائي المكثف المتغير (الثنائي متغير السعة) Variable capacitance diode

تصبح وصلة pn منطقة استنزاف كما عرفنا من قبل . وحيث إن منطقة الاستنزاف ليس بها حاملات فإنها تصبح عازلاً وتعمل كأنها مكثف . وبزيادة الجهد العكسي يزيد سمك منطقة

الاستنزاف ، وتحسب قيمة سعة هذا المكثف من المعادلة ($C = \epsilon A / l$) ويتضح منها أن قيمة السعة تقل كلما زاد سمك منطقة الاستنزاف (l) . والثنائي الذي له هذه الخواص يسمى ثنائي متغير السعة أو ثنائي مكثف متغير . ويبين الشكل ٦ - ٤٧ (ب) خواص هذا الثنائي، وتستخدم ثنائيات المكثف المتغير في دوائر التوليف ودوائر المذبذبات في أجهزة استقبال التلفزيون .



الشكل ٦ - ٤٧ ثنائي المكثف المتغير

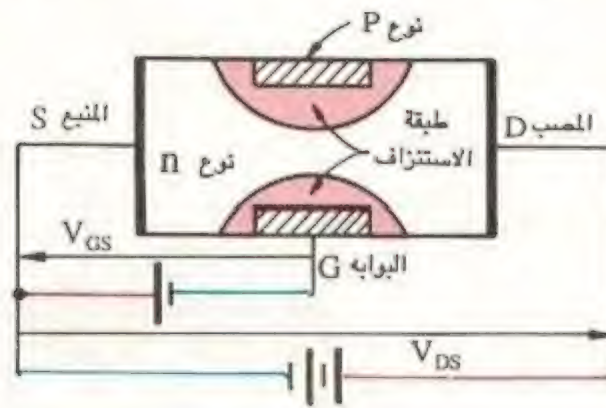
٦ - ٤ - ٢ الأنواع المختلفة من الترانزستورات

أ- ترانزستور تأثير المجال (FET)

في الشكل ٦ - ٤٨ نجد ترانزستور تأثير المجال (نوع الوصلة) له منطقة نوع - P صنعت في جزء من شبه موصل نوع - n وللترانزستور ثلاثة أقطاب هي المنبع والبوابة والمصب .

عند وضع جهد بين S و D في الشكل ٦ - ٤٨ تتحرك الحاملات الإلكترونية من S إلى D وعند وضع جهد عكسي بين S و G يزيد الاستنزاف في وصلة pn مما يمنع الحاملات عن الحركة . أي إن جهد البوابة V_{GS} يتحكم في تيار المصب I_D ويختلف هذا النوع عن أنواع الترانزستورات التي درسناها من قبل، حيث إن الجهد العكسي بين G , S يستخدم لمنع التيار مما يجعل من السهل تصميم مكبر له ممانعة دخل عالية . ويبين الشكل ٦ - ٤٩ خواص ترانزستور (FET) .

المكبر الذي له ممانعة دخل كبيرة يحتاج كمية قليلة من تيار مصدر الإشارة ، وهذا يناسب كل من تكبير الإشارات الصغيرة ومصدر الإشارة الذي له ممانعة داخلية كبيرة .



الشكل ٦ - ٤٨ مبدأ عمل ترانزستور (FET)

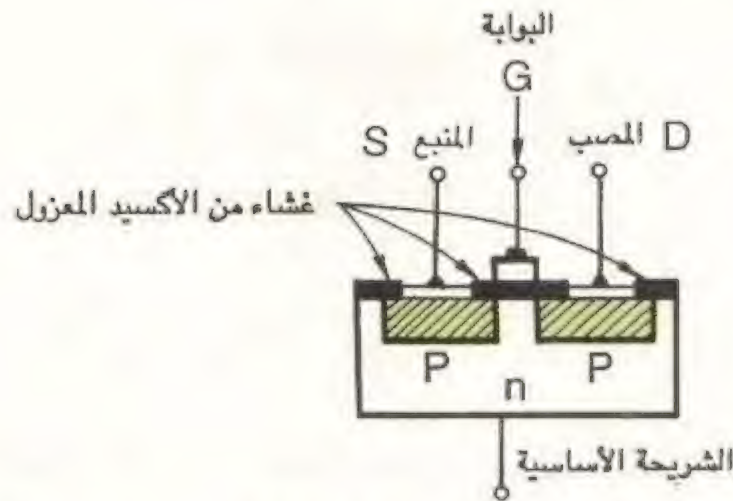


الشكل ٦ - ٤٩ منحنيات خواص ترانزستور (FET)

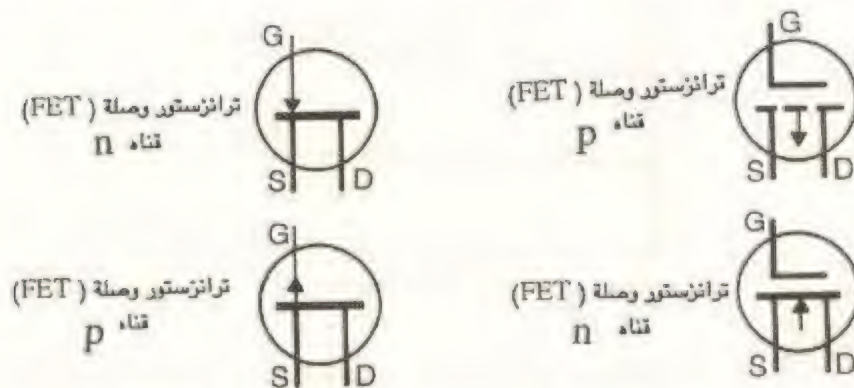
وتسمى المنطقة التي تتحرك فيها الحاملات القناة، وهناك قناة n وقناة p . أما الترانزستور المبين بالشكل ٦ - ٤٨ فهو ترانزستور وصلة (FET)، وترانزستور (FET) الذي يستخدم غشاء من العزل المؤكسد المبين في الشكل ٦ - ٥٠ ويسمى ترانزستور MOS FET {ترانزستور بوابة معزولة (FET)} .

ويقسم ترانزستور (MOS FET) إلى نوعين : نوع استنزاف به قناة في حالة عدم توصيل جهد البوابة، ونوع التعزيز وبه قناة صنعت عند توصيل جهد البوابة .

وتستهلك ترانزستورات FET قدرة أقل ، ويمكن تجميعها بصورة متقدمة ويبين الشكل ٦ - ٥١ رموز ترانزستور (FET) .



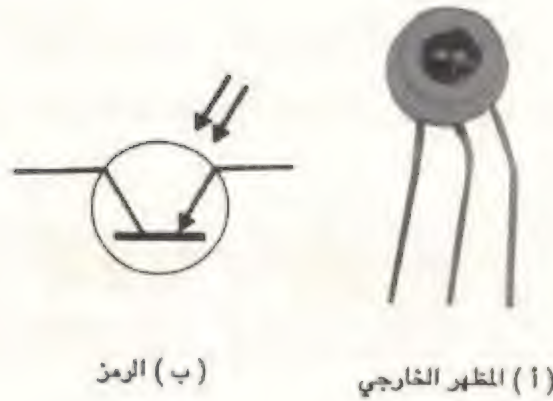
الشكل ٦ - ٥٠ ترانزستور (FET) نوع (MOS)



الشكل ٦ - ٥١ رموز ترانزستور (FET)

ب - الترانزستور الضوئي Phototransistor

عند تعريض وصلة ترانزستور pnp للضوء يمر تيار في المجمع . وهذا هو الترانزستور الضوئي ؛ ويبين الشكل ٦ - ٥٢ المظهر الخارجي ورمز الترانزستور الضوئي . وتستخدم الترانزستورات الضوئية لكشف الضوء .



الشكل ٦ - ٥٢ الترانزستور الضوئي

٦ - ٤ - ٣ الدائرة المتكاملة (IC) Integrated circuit

الدائرة المتكاملة (IC) هي حزمة تتكون من ترانزستورات كثيرة وثنائيات ومقاومات ومكثفات مثبتة على شريحة أساسية شبه موصلة نوع P - أو نوع n .

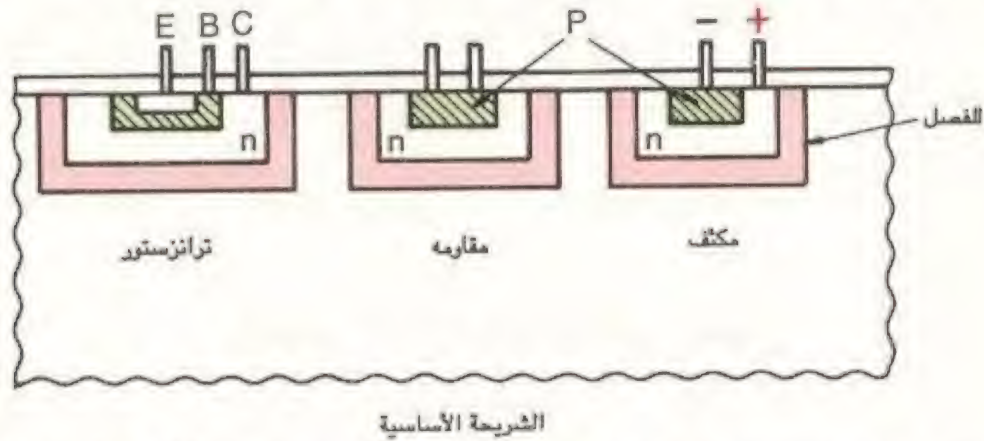


دوائر متكاملة ذات أطراف
8, 14, 16, 20, 24, 40
وأكثر متوفرة أيضا

الشكل ٦ - ٥٣ الدائرة المتكاملة

يبين الشكل ٦ - ٥٣ صورة للدوائر المتكاملة أما الشكل ٦ - ٥٤ فيبين مثلاً للدوائر المتكاملة ثنائية القطبية التي تحتوي على ترانزستور بين مكوناتها.

والمسافة بين أطراف الدائرة المتكاملة هي 2.53 مم ، وعند وضع الدائرة المتكاملة بحيث يمكن رؤية اسمها كما في الشكل ٦ - ٥٣ فإن الطرف الواقع أقصى اليسار في الناحية السفلية هو الطرف رقم 1 يليه باقي الأطراف تصاعدياً في اتجاه عكس اتجاه عقارب الساعة. درجة تكامل الدائرة المتكاملة يعتمد على عدد الترانزستورات التي تحتويها . وتصنف الدوائر المتكاملة إلى الطبقات الآتية طبقاً للوظيفة التي تقوم بها وعدد العناصر التي تحتويها :



الشكل ٦ - ٥٤ تركيب الدائرة المتكاملة ثنائية القطبية Biopolar IC

- * التكامل صغير المدى (SSI) : تكامل أقل من 100
- * التكامل متوسط المدى (MSI) : تكامل بين 100 و 1000
- * التكامل كبير المدى (LSI) : تكامل بين 1000 و 100000
- * التكامل ذو المدى الكبير جداً (VLSI) : تكامل أكبر من 100000
- * الدائرة المتكاملة التمثيلية : مكبر تشغيل
- * الدائرة المتكاملة الرقمية :

- دائرة منطقية من الثنائى والترانزستور (DTL)

وعناصر تكوينها الثنائيات والترانزستورات

- دائرة منطقية من الترانزستور (TTL)

وعناصر تكوينها الترانزستورات

ونعرض فيما يلى نماذج من هذه الدوائر المتكاملة .

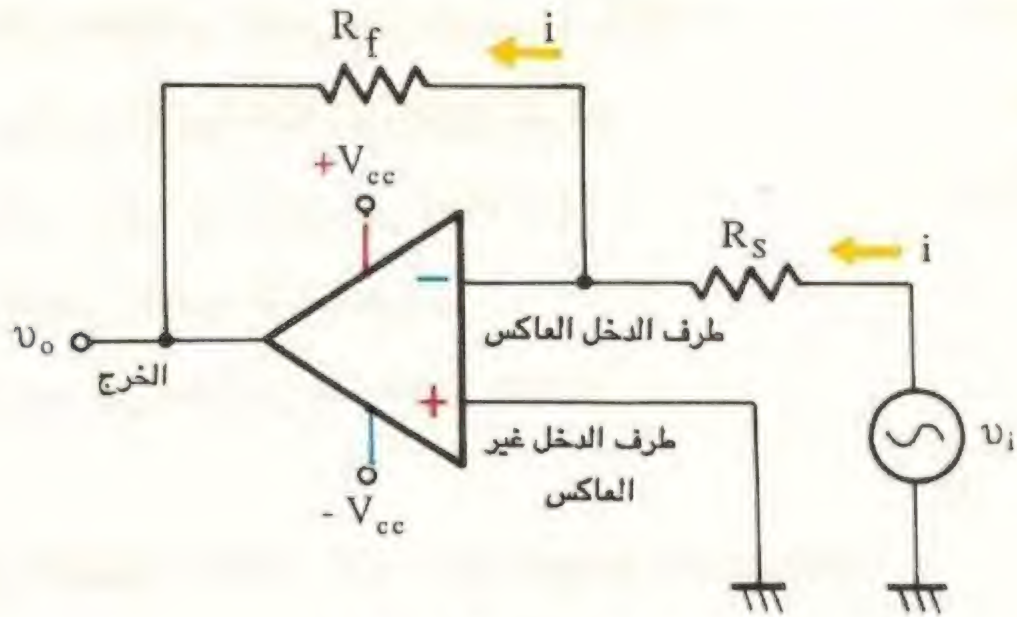
أ- مكبر التشغيل (OP AMP) Operational amplifier

مكبر التشغيل هو دائرة متكاملة تقوم بتكبير الجهود المستمرة التى يتراوح ترددها من الصفر إلى قيم عالية للتردد، وهذا المكبر له درجة تكبير عالية وممانعة دخل لانهائية وممانعة خرج تساوى صفراً . ومكبر التشغيل له طرف دخل عاكس وطرف دخل غير عاكس ويحتاج على وجه العموم إلى مصدرى قدرة مستمرة (DC) حوالى ± 15 فولت . ويبين الشكل ٦ - ٥٥ مثالاً لدائرة تكبير عكسي باستخدام التغذية الراجعة السالبة .

وعن طريق أداء التغذية الراجعة السالبة تعمل الدائرة بحيث يكون الجهد بين أطراف الدخل يساوى صفراً . وفى هذه الحالة فإن درجة التكبير تكون كما يلى :

$$i = \frac{v_i}{R_s} , \quad v_o = -i R_f = -\frac{R_f}{R_s} v_i ,$$

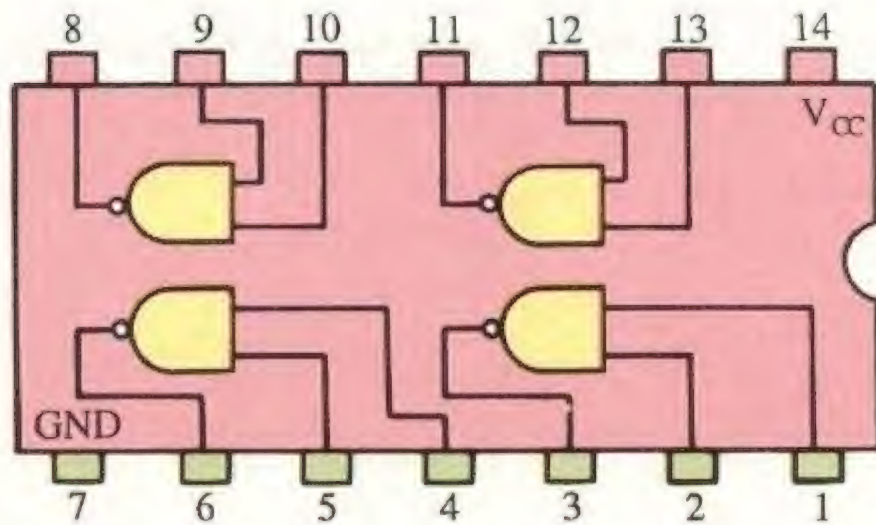
$$A = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_f}{R_s}$$



الشكل ٦ - ٥٥ مكبر التشغيل

ب- الدائرة المتكاملة نوع (TTL)

تطورت الدائرة المتكاملة نوع (TTL) عن الدائرة المتكاملة نوع (DTL) وتستخدم عادة لأجهزة الدوائر المنطقية التي سنتناولها فيما بعد .



الشكل ٦ - ٥٦ التركيب الداخلي لدائرة متكاملة TTL طراز (IC 7400)

هذه الدائرة المتكاملة تشمل النوع القياسي والنوع ذا القدرة المنخفضة (LS أو Schoattky)
ويستخدم نوع (LS) عادة لأنه يستهلك قدرة أقل وله تحمل كبير للجهد .
ويبين الشكل ٦ - ٥٦ التركيب الداخلي لدائرة متكاملة (TTL) طراز (IC 7400)
وسيأتي شرح الرموز المستخدمة في هذا الشكل فيما بعد .

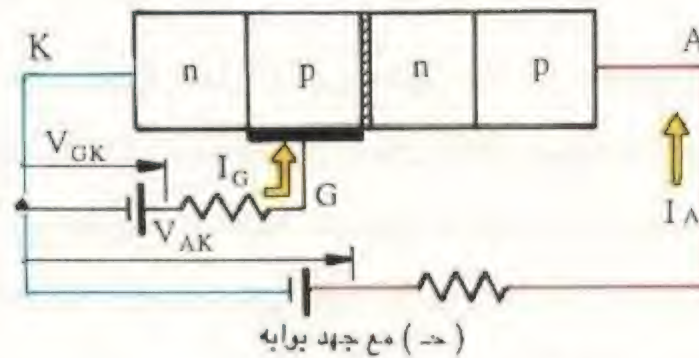
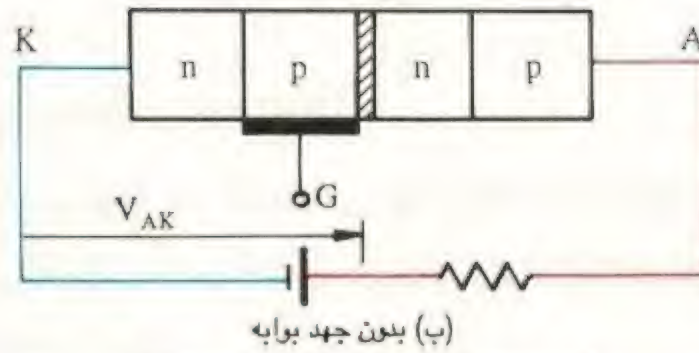
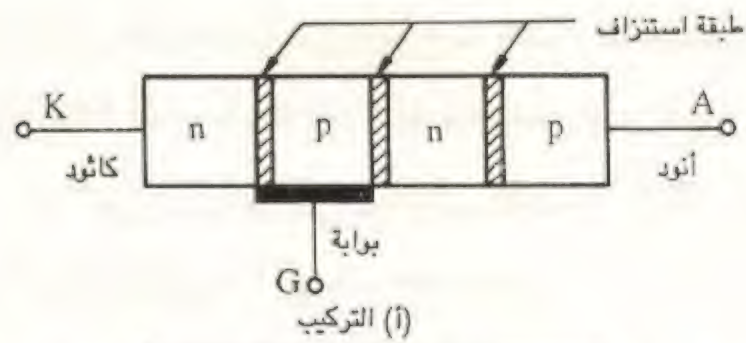
٦ - ٤ - ٤ الثايرستور Thyristor

الثايرستور هو أداة مصنوعة من السيليكون لها وصلة أربعة طبقات pnpn وثلاثة أقطاب
خارجية هي : الأنود و الكاثود و البوابة . ويمكن لهذه الأداة التحكم في الخرج بطريقة كبيرة
باستخدام الوظيفة التحكمية للبوابة .

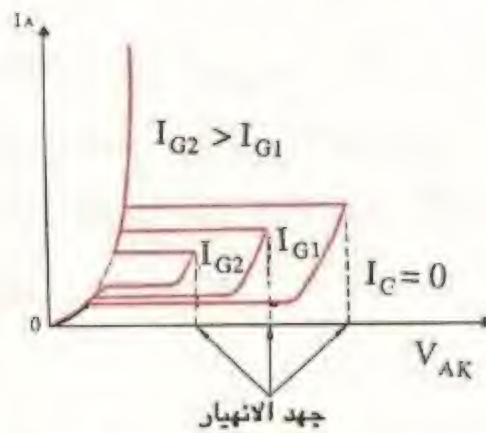
ويبين الشكل ٦ - ٥٧ مبدأ عمل الثايرستور . إذ أنه عند عدم توصيل أى جهد إلى
البوابة تكون هناك طبقات استنزافية حول وصلات pn . وبزيادة الجهد بين (A) و (K)
تدريجياً يجعل التيار يمر بطريقة مفاجئة عند جهد معين للسبب نفسه كما في ثنائي منظم
الجهد ، وقيمة الجهد عند هذا الوقت تسمى جهد الانهيار .

ويمكن التحكم في الانهيار بتوصيل جهد موجب إلى البوابة لأنه يقوم بتغيير سمك طبقة
الاستنزاف .

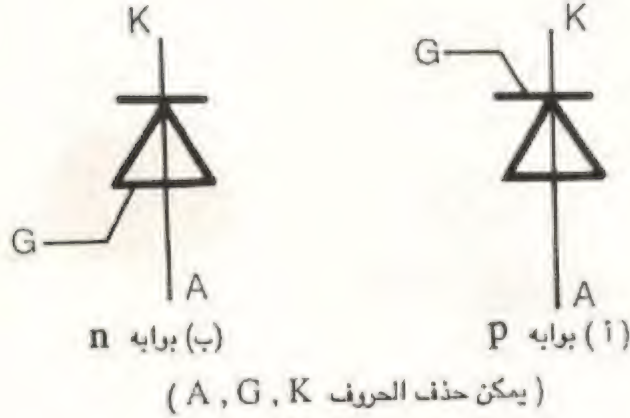
إن الحالة التي يبدأ عندها التيار في المرور بين (A) و (K) تسمى التشغيل . وبمجرد
أن يبدأ الثايرستور في العمل يستمر التيار في المرور بين (A) و (K) حتى لو أنقصنا
تيار البوابة . وعند توصيل جهد عكسي بين (A) و (K) يتوقف مرور التيار وتسمى هذه
الحالة الإبطال (إيقاف التشغيل) .



الشكل ٦ - ٥٧ مبدأ عمل الثايرستور



الشكل ٦ - ٥٨ خواص الثايرستور



الشكل ٦ - ٥٩ الشكل الخارجي ورموز الثايرستور

يبين الشكل ٦ - ٥٨ خواص الثايرستور ، ويمكن للثايرستور التحكم في وجه تيار متغير كبير باستخدام تيار متغير، كما يمكنه أيضاً التحكم في قدرة كبيرة باستخدام قدرة بوابة صغيرة في جهاز التحكم في شدة الإضاءة والتحكم في سرعة المحرك .

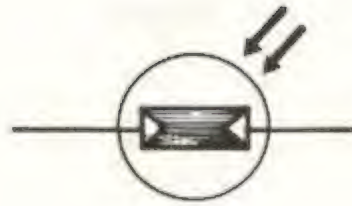
للتايرستور نوعان : بوابة p وهو الذي له بوابة مصنوعة من شبه موصل نوع - p في جانب الكاثود؛ وبوابة n الذي له بوابة من شبه موصل نوع - n في جانب الأنود . ويبين الشكل ٦ - ٥٩ الشكل الخارجي ورموز الثايرستور .

٦ - ٤ - ٥ عناصر أخرى من أشباه الموصلات

١ - الخلية الضوئية الموصله Photoconductive cell

عند سقوط الضوء على نوع من أنواع أشباه الموصلات يكتسب شبه الموصل طاقة فيزيد عدد الحاملات وتقل مقاومته . ويسمى هذا النوع الخلية الضوئية الموصله مثل خلية كبريتيد الكادميوم . ويبين الشكل ٦ - ٦٠ الشكل الخارجي ورمز هذه الخلية . تستخدم الخلايا

الضوئية الموصلة في كشف الضوء وفي مقياس التعرض للضوء المستخدم في كاميرات التصوير الفوتوغرافية .

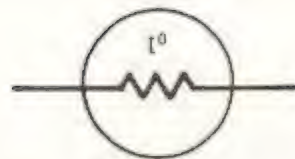


(ب) الرمز



(١) الشكل الخارجي

الشكل ٦ - ٦٠ الخلية الضوئية الموصلة



(ب) الرمز



(١) الشكل الخارجي

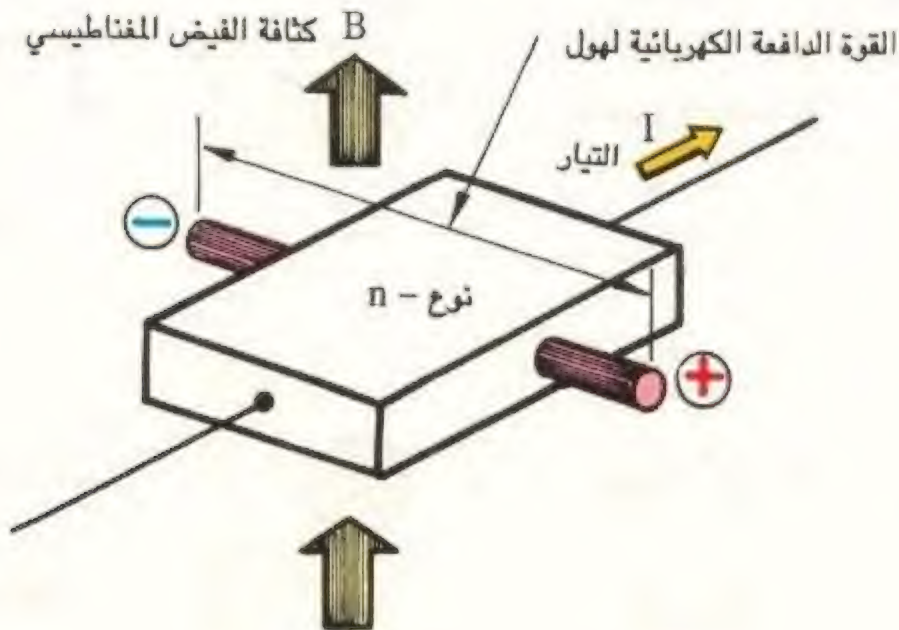
الشكل ٦ - ٦١ الثرميستور (المقاومة الحرارية)

ب- الثرميستور (المقاومة الحرارية) Thermistor

الثرميستور هو اداة من أشباه الموصلات تقل مقاومتها بارتفاع درجة الحرارة . وعندما تقل مقاومتها يقل الجهد عليها ويستخدم التغير في هذا الجهد للتحكم في درجة الحرارة . يبين الشكل ٦ - ٦١ الشكل الخارجى ورمز الثرميستور .

ج- أداة هول Hall device

يبين الشكل ٦ - ٦٢ أنه عند إمرار تيار في شبه الموصل ووضعه في مجال مغناطيسي عموديا على اتجاه التيار يتولد جهد في اتجاه عمودي على كل من التيار والمجال المغناطيسي . وتسمى هذه الظاهرة تأثير هول، ويمكن تأكيدها بتطبيق قاعدة اليد اليسرى لفلمنج على حركة الحاملات في شبه الموصل . وعندها ينشأ جهد يتناسب مع حاصل ضرب التيار في شدة المجال المغناطيسي . وتستخدم أداة هول في قياس الفيض المغناطيسي .



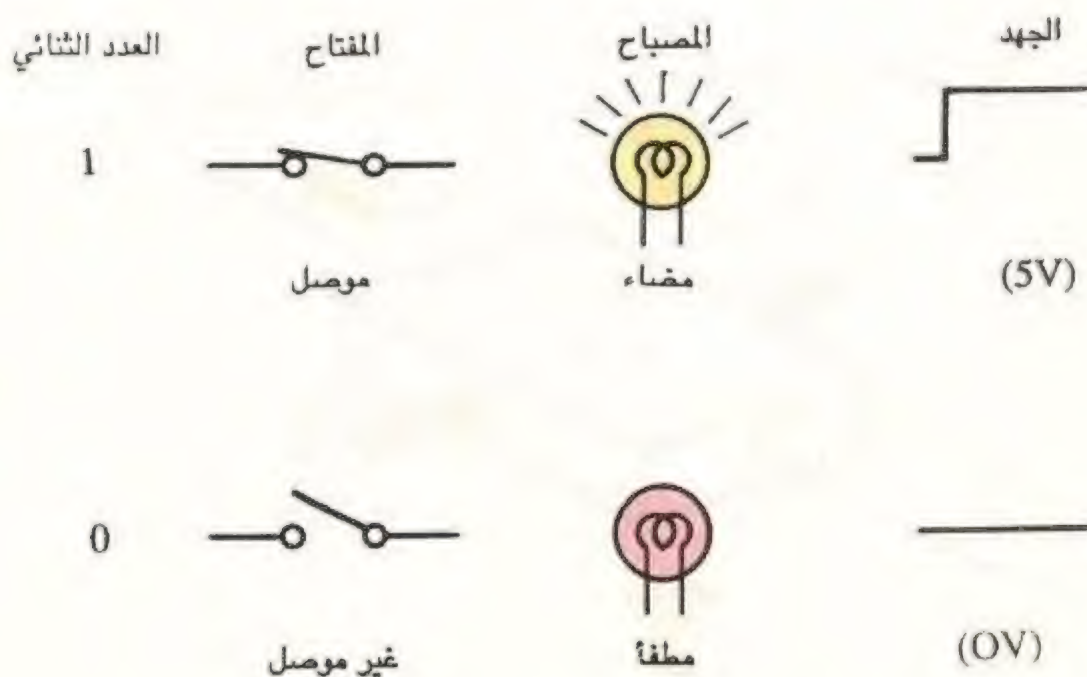
الشكل ٦ - ٦٢ تأثير هول

٦ - ٥ الدائرة المنطقية Logic circuit

٦ - ٥ - ١ الدائرة المنطقية الأساسية

١ - العدد الثنائي Binary number والدائرة المنطقية

الأرقام العشرية المستخدمة في حياتنا اليومية تحتوي على عشرة عناصر من صفر إلى 9 وفائض كل 10 . وعلى العكس فإن نظام العدد الثنائي يمثل الأرقام باستخدام عنصرين صفر و 1 والفائض كل 2 . وفي الدائرة الكهربائية قيم صفر و 1 تناظر حالتين مثل جهد مرتفع وجهد منخفض أو مفتاح موصل ومفتاح غير موصل كما في الشكل ٦ - ٦٣ . ففي الحاسوب ، باستخدام قيمتين مثل 5 فولت و 2 فولت مثلاً ، يمكن إجراء العديد من العمليات الحسابية المختلفة . والدائرة المنطقية هي دائرة يتم فيها إجراء العمليات باستخدام قيمتين . وهناك أساساً ثلاثة دوائر منطقية وهي : دائرة (AND) ودائرة (OR) ودائرة (NOT) .



الشكل ٦ - ٦٣ التناظر بين العدد الثنائي والدائرة الكهربائية

ب - دائرة (AND)

في الدائرة المبينة في الشكل ٦ - ٦٤ تضيء اللمبة L عندما يكون كل من المفتاح A والمفتاح B في وضع التوصيل .

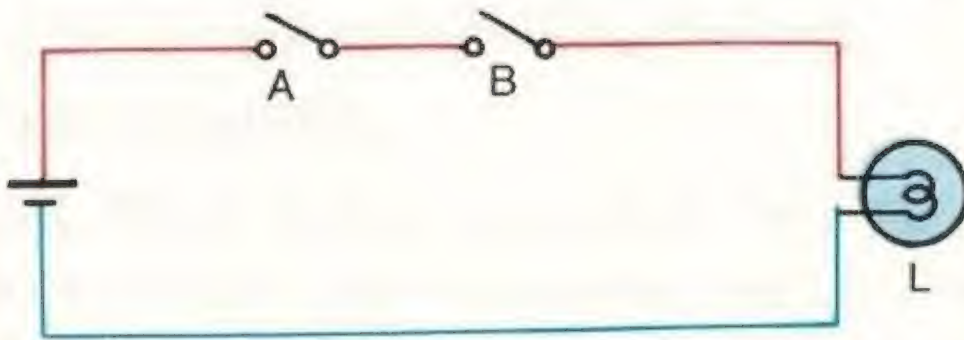
في دائرة AND (حاصل الضرب المنطقي) تشغيل المفتاح يناظر (1) وعدم تشغيله يناظر (صفر) . إضاءة اللمبة تناظر (1) وإطفائها يناظر (صفر) ويكون الخرج (1) عندما يكون كل نقاط الدخل (1) .

ج - دائرة (OR)

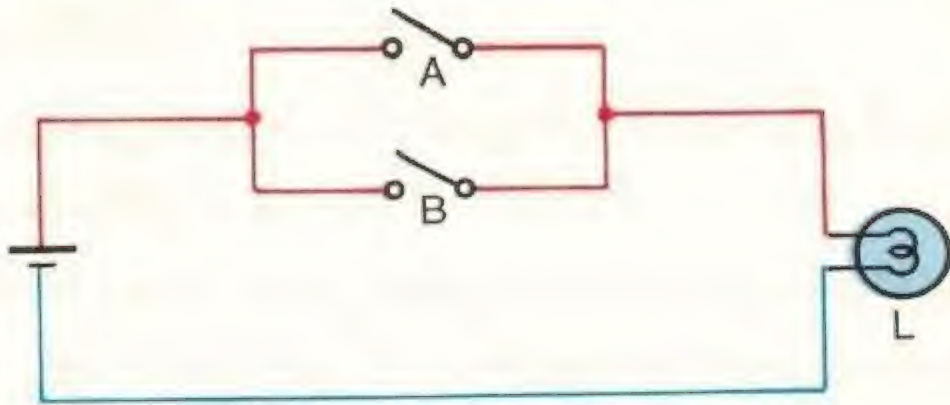
في الدائرة المبينة بالشكل ٦ - ٦٥ تضيء اللمبة L عند تشغيل أي من المفتاحين A أو B . وهكذا فإنه في دائرة OR (الجمع المنطقي) يكون الخرج 1 عندما يكون أي من نقاط الدخل (1) .

د - دائرة (NOT)

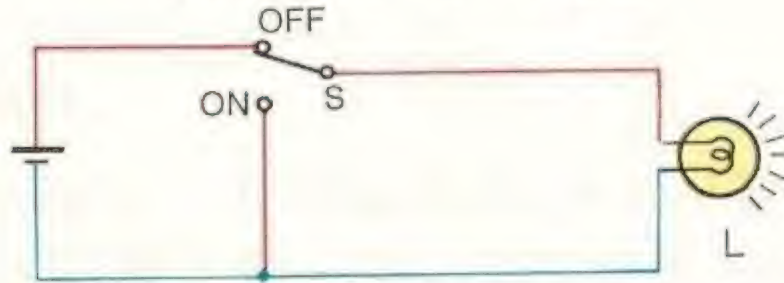
في الدائرة المبينة بالشكل ٦ - ٦٦ تنطفئ اللمبة L عند عدم تشغيل المفتاح S وتضيء اللمبة عند تشغيله .



الشكل ٦ - ٦٤ دائرة (AND)



الشكل ٦ - ٦٥ دائرة (OR)



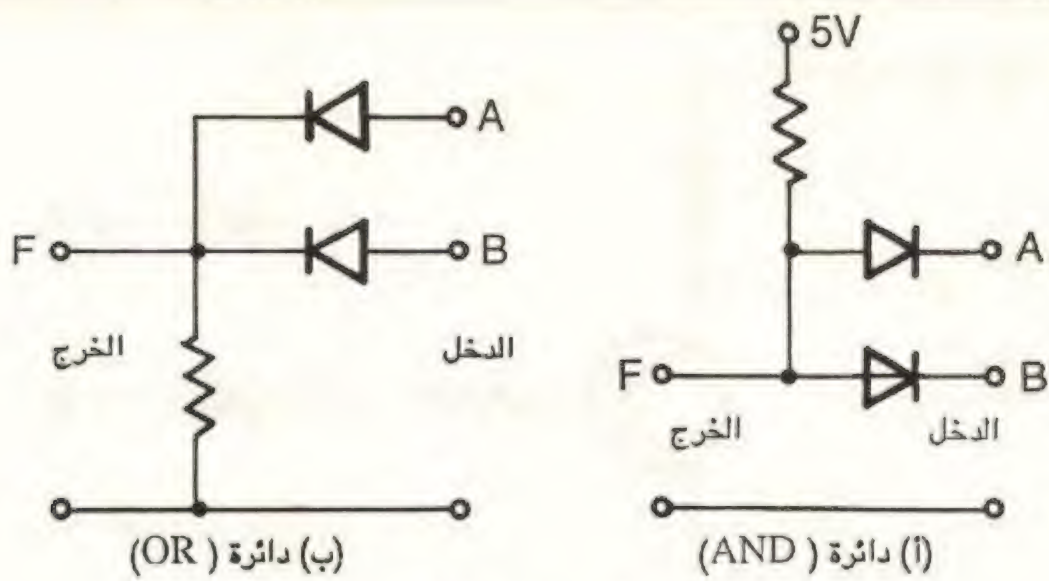
الشكل ٦ - ٦٦ دائرة (NOT)

أي إنه إذا كان الدخل (1) يكون الخرج (صفر) والعكس صحيح . ودائرة (NOT) تعكس إشارة الدخل .

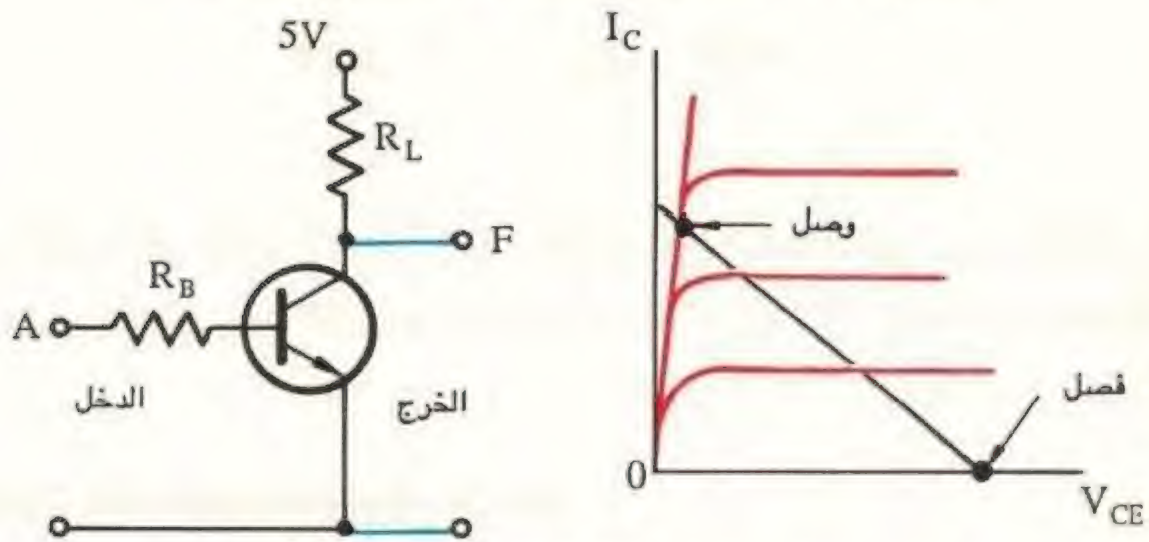
٦ - ٥ - ٢ الدائرة المنطقية باستخدام الثنائى والترانزستور

أ- الدائرة المنطقية باستخدام الثنائى

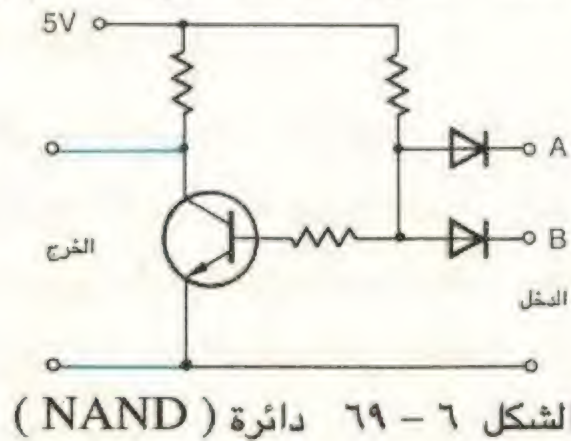
يمر التيار في الثنائى عند توصيل جهد موجب وسالب إلى الأنود والكاثود على الترتيب حيث إن الجهد 5 فولت يناظر (1) والجهد صفر فولت يناظر (صفر) . وفي الشكل ٦ - ٦٧ (أ) عندما يكون كل من طرفى الدخل عند جهد 5 فولت يكون الثنائى غير موصلين ويكون الخرج 5 فولت . وهذه هي دائرة (AND) .



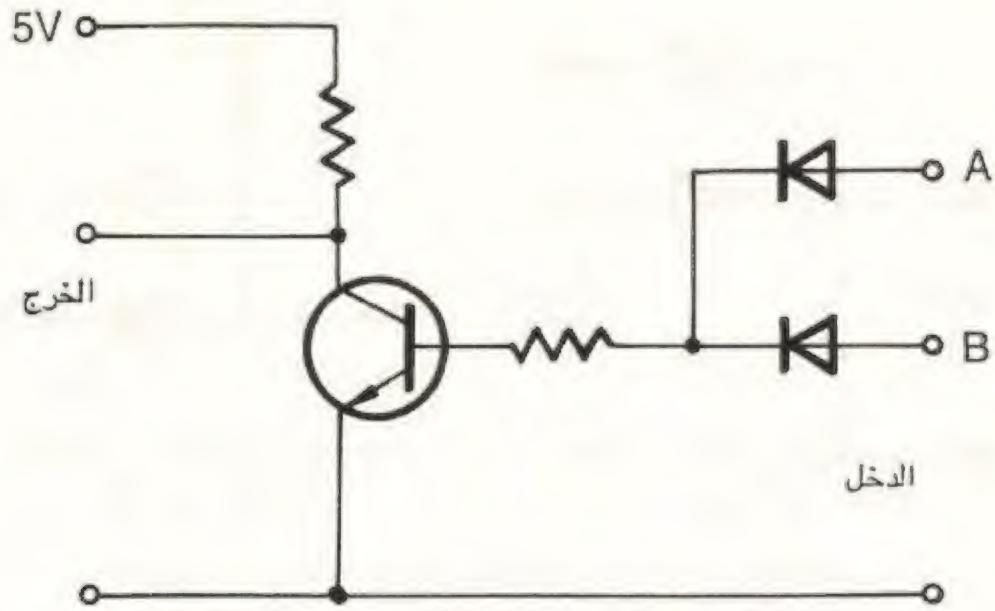
الشكل ٦ - ٦٧ الدوائر المنطقية باستخدام الثنائيات



الشكل ٦ - ٦٨ دائرة (NOT) باستخدام ترانزستور



الشكل ٦ - ٦٩ دائرة (NAND)



الشكل ٦ - ٧٠ دائرة (NOR)

وعلى العكس ففي الشكل ٦٧ - ٦ (ب) عند توصيل 5 فولت إلى أى من الأطراف A أو B من أطراف الدخل يعمل الثنائي ويظهر 5 فولت عند الخرج (F) . وهذه هي دائرة (OR)

ب- الدائرة المنطقية باستخدام الترانزستور

يمكن استخدام تشغيل الترانزستور كمفتاح في الدوائر المنطقية حيث تمثل حالة مرور التيار (1) وتمثل حالة إيقاف التيار (صفر) .

في الدائرة المبينة بالشكل ٦٨ - ٦ عند عدم وجود جهد عند الطرف A لا يمر تيار في الترانزستور ويكون جهد الخرج 5 فولت . عند وضع جهد 5 فولت عند الطرف A يمر تيار القاعدة ويعمل الترانزستور ويكون جهد الخرج تقريباً صفراً . وهكذا فإن (صفر) عند الدخل تعطي (1) عند الخرج و (1) عند الدخل تعطي (صفر) عند الخرج . وهذه هي دائرة (NOT) .

والدائرة المبينة في الشكل ٦ - ٦٩ هي دائرة (NAND) مكونة من تجميع دائرة (AND) ودائرة (NOT) . والدائرة المبينة في الشكل ٦ - ٧٠ هي دائرة (NOR) مكونة من تجميع دائرة (OR) مع دائرة (NOT) .

والدائرة المنطقية المكونة من دوائر متكاملة تعتمد على دوائر (NAND) ودوائر (NOR) باستخدام الترانزستور ، لأن الإشارة لاتنقص نتيجة للتكبير الحادث في الترانزستور .

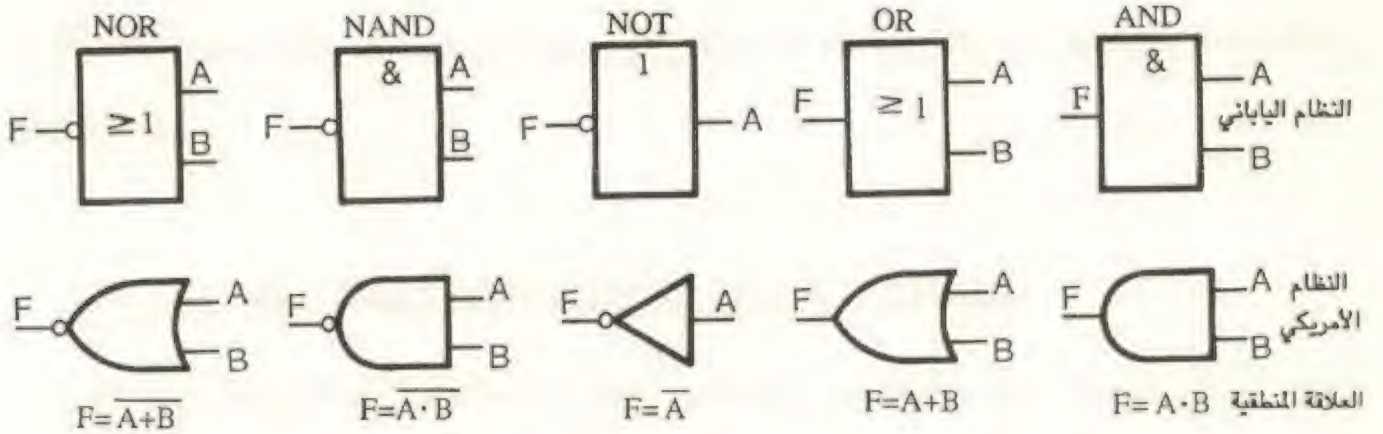
ح - جدول القيم المنطقية Truth table ورمز الدائرة المنطقية

يبين جدول القيم المنطقية العلاقة بين خرج ودخل دائرة منطقية . ويبين الجدول ٦ - ١ جدول القيم المنطقية للدوائر المنطقية . وبالإضافة إلى ذلك يمكن استخدام المعادلات المنطقية في تمثيل العلاقة بين الخرج والدخل للدوائر المنطقية . وفي هذه المعادلات نستخدم (.) لتمثيل (AND) ونستخدم (+) لتمثيل (OR) ونستخدم الشرطة العلوية (—) لتمثيل (NOT) .

الدخل		الخرج				
A	B	AND	OR	NOT(A)	NAND	NOR
		A.B	A+B	\overline{A}	$\overline{A.B}$	$\overline{A+B}$
0	0	0	0	1	1	1
0	1	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1	0
1	1	1	1	0	0	0

الجدول ٦ - ١ جدول القيم المنطقية

ويبين الشكل ٦ - ٧١ رموز الدوائر المنطقية ، حيث وضع الصف العلوي طبقاً للنظام القياسي الياباني، والصف السفلي طبقاً للنظام القياسي الأمريكي .



الشكل ٦ - ٧١ رموز الدوائر المنطقية وعلاقاتها المنطقية

٦ - ٦ الحاسوب والدوائر المختلفة

١ - ٦ - ٦ تركيب الحاسوب Structure of a computer

يتكون الحاسوب أساساً من الدوائر المنطقية التي سبق دراستها، ويستخدم الحاسوب في العمليات الحسابية المختلفة بالإضافة إلى أهمية في المساعدة في إدارة الأعمال والتحكم فيها.

١- تركيب الحاسوب

يبين الشكل ٦ - ٧٢ المظهر الخارجي لنظام الحاسوب . ويحتوى الحاسوب على خمسة عناصر : وحدة الإدخال ، ووحدة الإخراج ، ووحدة التشغيل ، ووحدة التحكم ، ووحدة الذاكرة . والوظائف الأساسية لهذه الوحدات هي الإدخال والإخراج والتشغيل والتحكم

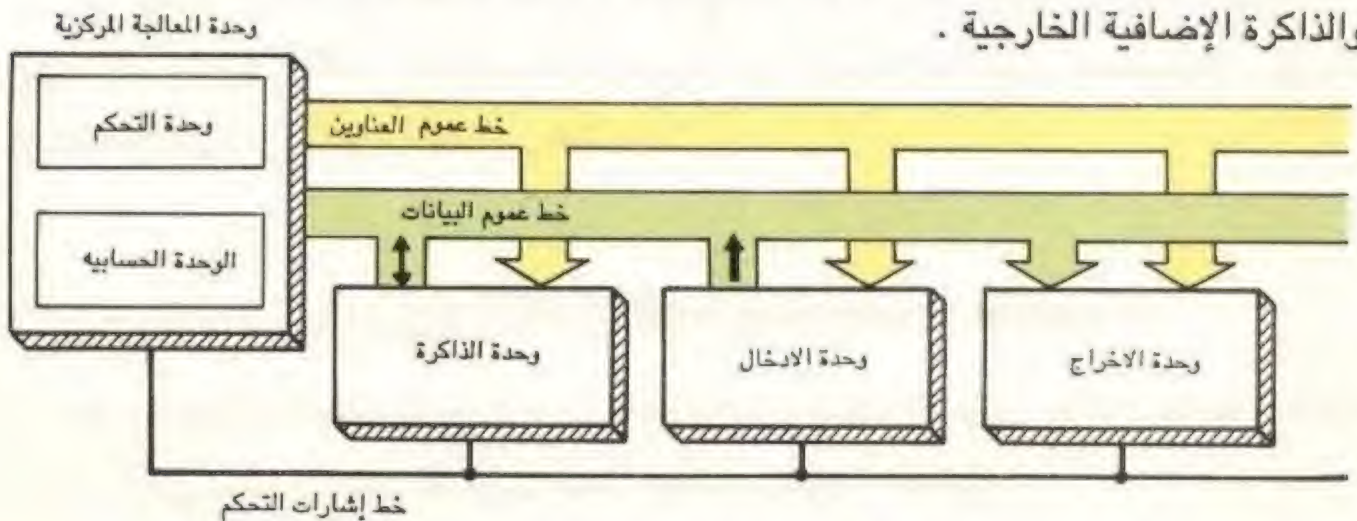
والذاكرة على الترتيب . وتتصل هذه الوحدات ببعضها كما في الشكل ٦-٧٣ عن طريق خط عموم البيانات* (الذى يقوم بإرسال البيانات مثل القيم العددية) وخط عموم العناوين** (الذى يرسل المعلومات إلى وحدة الذاكرة) وأسلاك إشارات التحكم (التى ترسل إشارات التحكم إلى كل وحدة) .



الشكل ٦ - ٧٢ نظام الحاسوب

وتحتوى وحدة الادخال على لوحة المفاتيح وأداة الترقيم وقارئ الكروت . ويجرى تخزين البرنامج والبيانات التى تأتى من وحدة الادخال في وحدة الذاكرة .

كما تحتوى وحدة الذاكرة على الذاكرة الرئيسية الموجودة داخل جسم الحاسوب والذاكرة الإضافية الخارجية .



الشكل ٦ - ٧٣ تركيب الحاسوب

* المقصود بالبيانات الحقائق والمفاهيم والتوجيهات موضوعة في شكل مناسب لتوصيلها وفهمها ومعالجتها عن طريق الانسان أو أداة أوتوماتيكية .

** خط العموم هو المسار المشترك لارسال البيانات من أية نقطة اختيارية ابتدائية إلى أية نقطة اختيارية من بين النقط النهائية (تعريف JIS).

وتستخدم الدوائر المتكاملة كبيرة المدى (LSI) للذاكرة الرئيسية التي تحتوي على الذاكرة ذات الوصول العشوائي (RAM) التي يمكن قراءة مابها من بيانات وكتابة البيانات فيها ، وذاكرة القراءة فقط (ROM) والتي يمكن قراءة مابها من بيانات .

وتضم الذاكرة الإضافية الشرائط الممغنطة والأقراص الممغنطة التي تستخدم في الحواسيب الكبيرة والقرص المرن في الحواسيب الصغيرة .

وتقوم وحدة التحكم بتفهم تعليمات البرنامج المخزون في وحدة الذاكرة واحدة تلو الأخرى وتوجه كل وحدة لتنفيذ الاوامر الصادرة إليها .

كما تقوم وحدة التشغيل بالوصول إلى البيانات في الذاكرة طبقا لتوجيهات وحدة التحكم وتنفذ العملية وتخزن النتيجة في وحدة الذاكرة .

أما وحدة الأخراج فتقوم بإظهار نتائج هذه العمليات ، وهناك وحدة العرض (الشاشة) (CRT) والطابعة والراسمة في أجهزة الحاسوب الصغيرة ، وتوجد الطابعة الكبيرة في أجهزة الحاسوب الضخمة .

ب- وحدة المعالجة المركزية (CPU) Central processing unit

تضم وحدة المعالجة المركزية كل من وحدة التشغيل ووحدة التحكم . وتحتوى وحدة المعالجة المركزية على دوائر سجلات التخزين المؤقت للبيانات والدوائر المنطقية .

فى الحاسوب ذى نظام التحكم التتابعى يتم تفهم وتنفيذ الأوامر واحداً بعد الآخر ، ثم الذهاب إلى الأمر التالي وهكذا ويكون هناك تكرار وتناوب لدورة الإحضار ودورة التنفيذ . ويمثل نبضات التوقيت الإشارات التى تحفظ العلاقات الزمنية . ويختلف تردد نبضات التوقيت من حاسوب لآخر وكلما زاد هذا التردد كان إجراء العمليات أسرع .

٦ - ٦ - ٢ الأعداد الثنائية والأعداد الست عشرية Hexadecimal numbers

الرقم العشرى يعبر عن الأعداد من صفر الى 9 وفائض كل 10 . وفى نظام الأعداد العشرية يمثل الرقم 432 كما يلي :

$$432 = 4 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 2 \times 10^0$$

وكل وحدة من الرقم العشرى تناظر 10 مرفوعة لأس معين . وتسمى الـ 10 هنا القاعدة ومن ناحية أخرى فإنه فى نظام الأعداد الثنائية يتم تمثيل الأعداد باستخدام العنصرين (صفر) و (1) وفائض كل 2 . كل وحدة تناظر 2 مرفوعة لأس معين . ونبين فيما يلى طريقة تحويل الرقم الثنائى 10011011 إلى رقم عشرى .

الرقم الثنائى	1	0	0	1	1	0	1	1
القوة	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
الوزن	128	64	32	16	8	4	2	1

$$1 \times 128 + 0 \times 64 + 0 \times 32 + 1 \times 16 + 1 \times 8 + 0 \times 4 + 1 \times 2 + 1 \times 1 = 155$$

وهكذا فإن الرقم الثنائى (10011011) هو الرقم العشرى (155) .

وعلى العكس فإنه عند التحويل من رقم عشرى إلى رقم ثنائى نقوم بقسمة الرقم العشرى على 2 ونستخدم التنظيم العكسى للمتبقى .

وفى هذا الكتاب نضع رقم 10 أو رقم 2 في يمين العدد بعد وضعه بين قوسين ()
لتمييز الأعداد العشرية من الأعداد الثنائية .

وفي نظام الأعداد الست عشري كل وحدة فيه تناظر 16 مرفوعة لأس معين وفائض كل 16.

ثنائية 2	ست عشرية 16	عشرية 10	ثنائية 2	ست عشرية 16	عشرية 10
1001	9	9	0	0	0
1010	A	10	1	1	1
1011	B	11	10	2	2
1100	C	12	11	3	3
1101	D	13	100	4	4
1110	E	14	101	5	5
1111	F	15	110	6	6
10000	10	16	111	7	7
10001	11	17	1000	8	8

الجدول ٦ - ٢ تمثيل الأرقام في أنظمة الأعداد الثنائية والعشرية والست عشرية

وفى هذا النظام تستخدم العناصر نفسها من صفر إلى 9 كما في النظام العشري ثم
تضاف الحروف الأبجدية من (A) إلى (F) لتمثيل الأعداد من (10) إلى (15) ويبين الجدول
٦ - ٢ العلاقة بين الأعداد الثنائية والعشرية والست عشرية.

ويمكن تحويل العدد $(2A)_{16}$ في النظام الست عشري إلى عدد عشري باستخدام الخطوات
الآتية : الوحدة الواحدة من عناصر النظام الست عشري تناظر أربعة وحدات من الأعداد
الثنائية . أي إن التحويل إلى عدد عشري يمكن تنفيذه باستخدام العدد الثنائي .

$$(2A)_{16} = 2 \times 16^1 + 10 \times 16^0 = 32 + 10 = (42)_{10}$$

$$(2A)_{16} = (00101010)_2 = 32 + 8 + 2 = (42)_{10}$$

سؤال ٨

حوّل الأعداد العشرية الآتية إلى أعداد ثنائية :

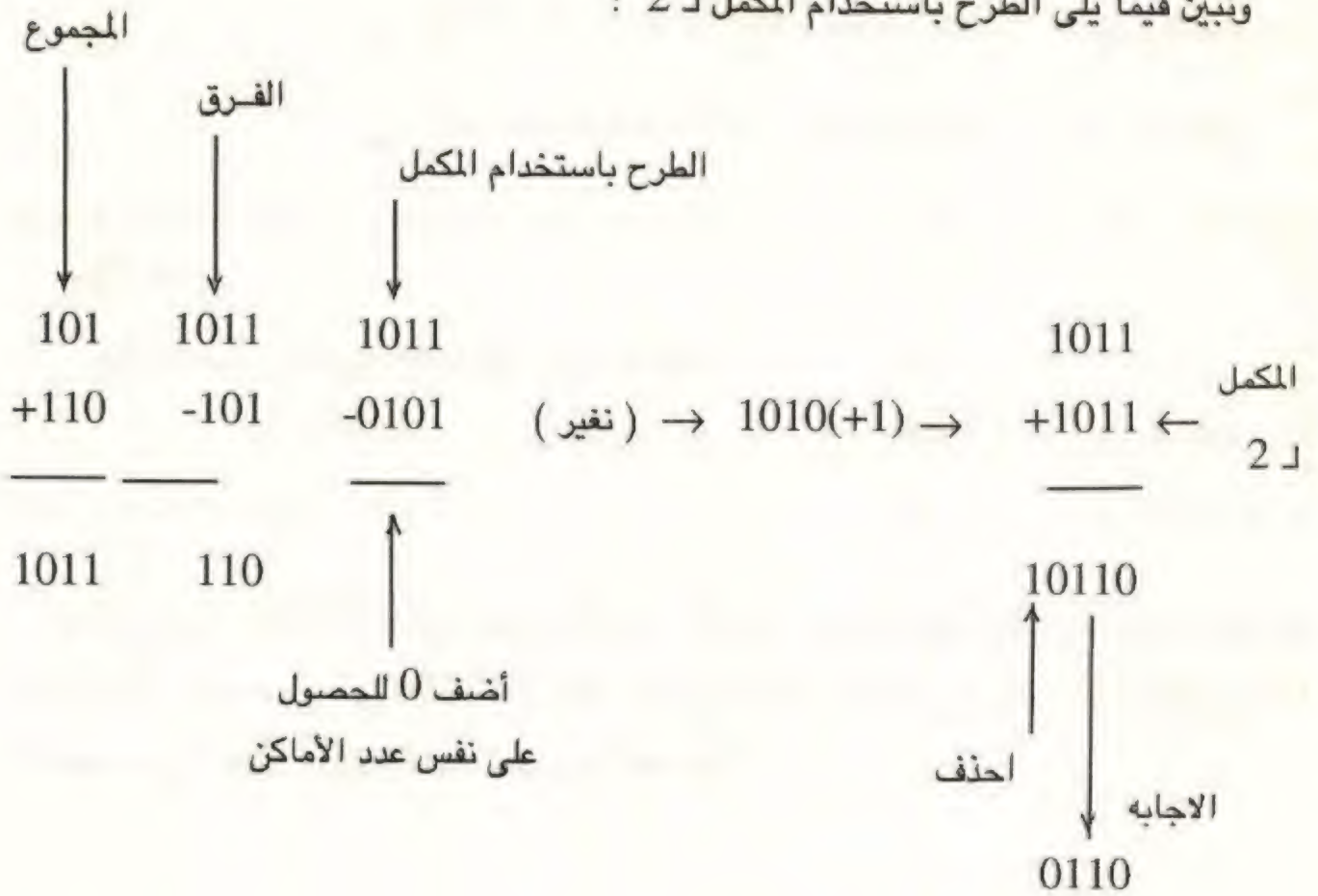
$$(35)_{10} \quad - (100)_{10} \quad - (255)_{10} \quad - (500)_{10}$$

يمكن إجراء عمليات الجمع والطرح للأعداد الثنائية . وتتم عملية الطرح عادة باستخدام المكمل لـ 2 . نحصل على المكمل لـ 2 لعدد ثنائى بتغيير (صفر) مكان (1) وتغيير (1) مكان (صفر) فى العدد الأصلى ثم إضافة 1 .

0	1	0	1
+0	+0	+1	+1
-----	-----	-----	-----
0	1	1	10

0	1	1	10
-0	-0	-1	-1
-----	-----	-----	-----
0	1	0	1

ونبين فيما يلي الطرح باستخدام المكمل لـ 2 :



سؤال ٩

احسب الأعداد الثنائية الآتية :

(1) $1011 + 1101 =$

(2) $1110 - 111 =$

٦ - ٣ - دائرة التشغيل Operational circuit

تقوم دائرة الجمع بتشغيل إضافة الأعداد الثنائية . في حين تقوم دائرة الجمع النصفية بتشغيل إضافة رقمين فقط . ودائرة الجمع الكلي تقوم بتشغيل الإضافة مع وجود الفائض . ويمكن إجراء الطرح بالإضافة باستخدام المكمل لـ 2 . بينما تتم عمليتي الضرب والقسمة باستخدام دوائر الجمع .

أ - دائرة الجمع النصفى Half - adding circuit

يبين الجدول ٦ - ٣ نتيجة إضافة رقمين ثنائيين A , B .

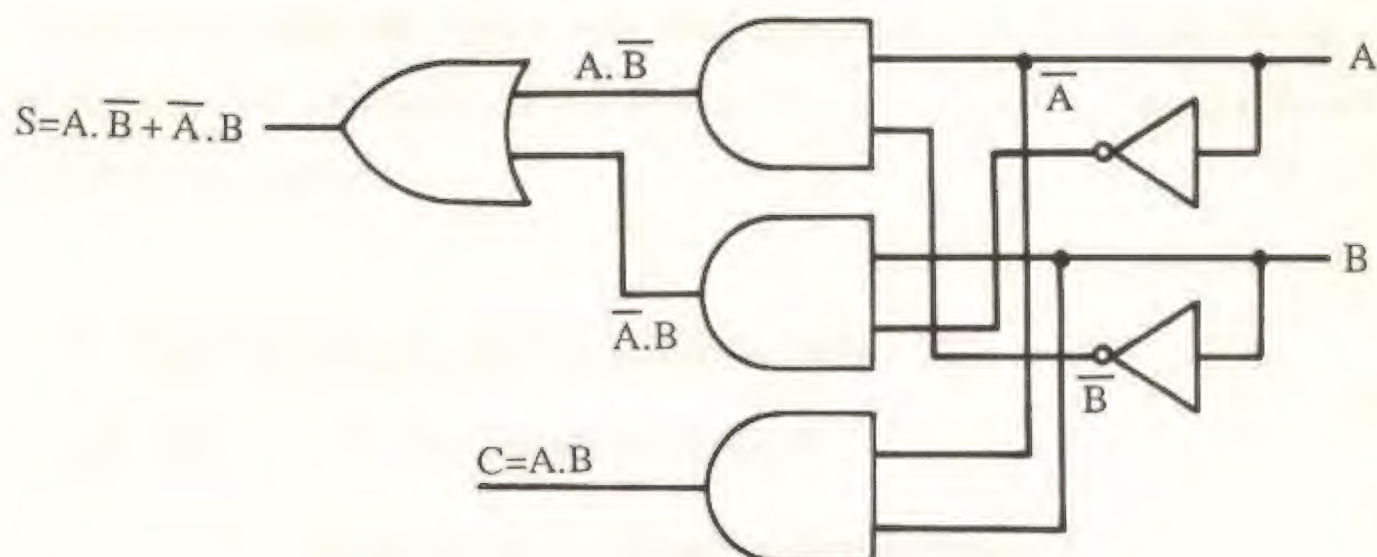
A	B	الحمل C	المجموع S
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

الجدول ٦ - ٣ جدول القيم المنطقية لدائرة الجمع النصفى

يمكن استنتاج المعادلة المنطقية من جدول القيم المنطقية بتوصيل (AND) لأطراف الدخل التى تعطي (1) ثم توصيل خرج دوائر (AND) إلى دائرة (OR) . وهكذا فإن المعادلات المنطقية لكل من S , C تكون كالتى :

$$C = A \cdot B , \quad S = A \cdot \bar{B} + \bar{A} \cdot B$$

وطبقاً لهذه المعادلات المنطقية فإن الدائرة المنطقية لدائرة الجمع النصفى يبينها الشكل ٦ - ٧٤ .



الشكل ٦ - ٧٤ دائرة الجمع النصفى

Full - adding circuit ب- دائرة الجمع الكلي

تحتوي دائرة الجمع الكلي على ثلاثة أطراف للدخل لاحتواء الفائض من الوحدة الأقل عند الدخل . والمعادلات المنطقية لدائرة الجمع الكلي هي :

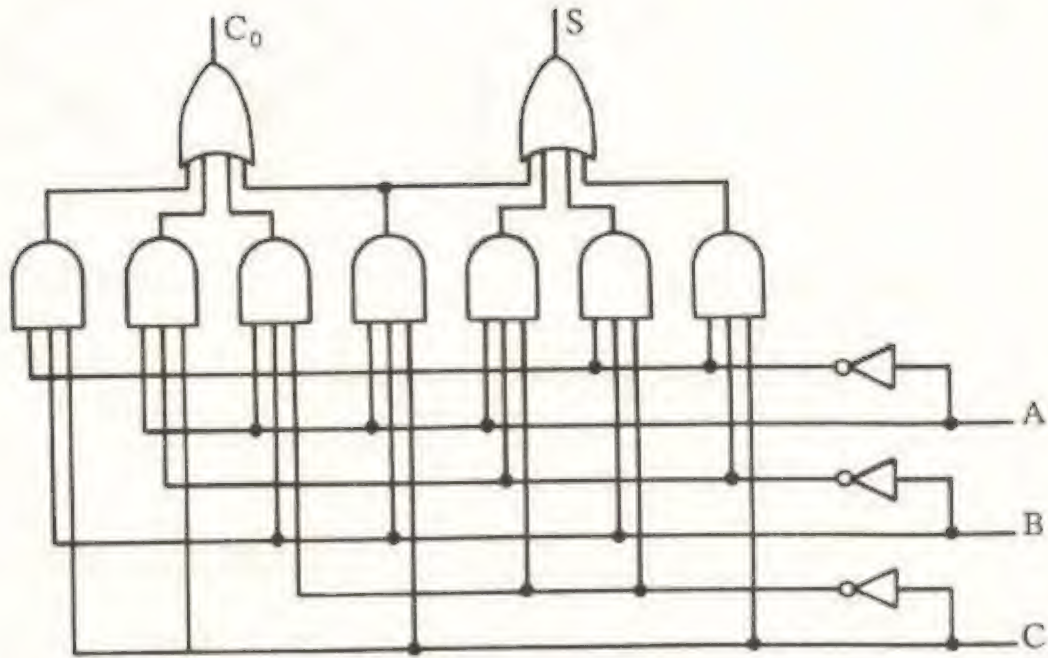
$$S = A \cdot \overline{B} \cdot \overline{C} + A \cdot \overline{B} \cdot C + A \cdot B \cdot \overline{C} + A \cdot B \cdot C$$

$$C_0 = \bar{A} \cdot B \cdot C + A \cdot \bar{B} \cdot C + A \cdot B \cdot \bar{C} + A \cdot B \cdot C$$

ويبين الشكل ٦ - ٧٥ مثالاً لدائرة الجمع الكلي .

المجموع S	الحمل C_0	B	A	C
0	0	0	0	0
1	0	1	0	0
1	0	0	1	0
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
0	1	1	0	1
0	1	0	1	1
1	1	1	1	1

الجدول ٦ - ٤ جدول القيم المنطقية لدائرة الجمع الكلي



الشكل ٦ - ٧٥ دائرة الجمع الكلي

تمارين

١ - اشرح التعبيرات الآتية :

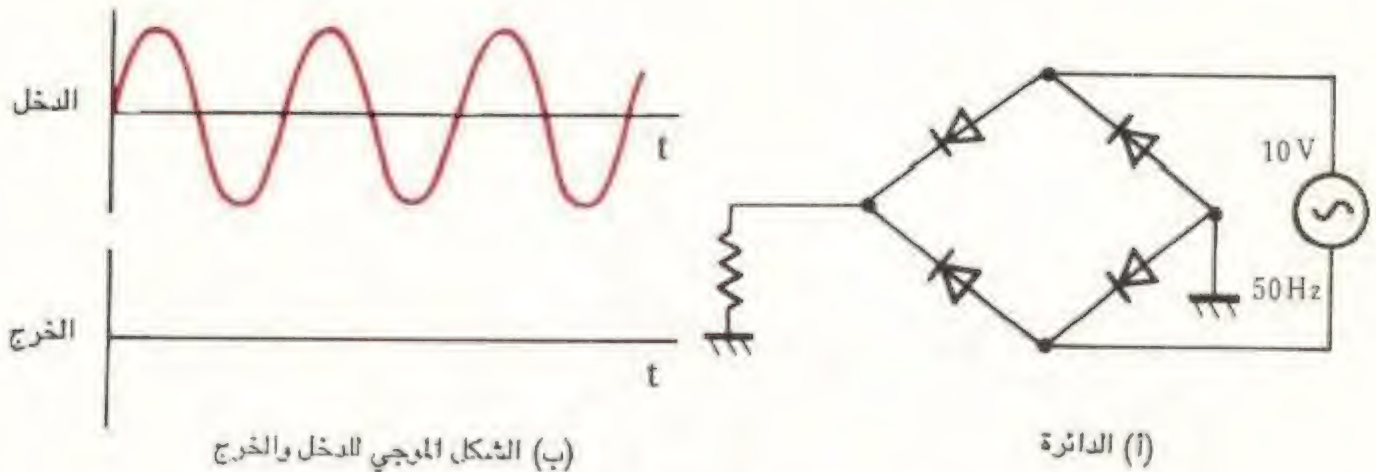
(١) الكترولن التكافؤ .

(٢) شبه موصل نوع n .

(٣) الحاملات الأغلبية في شبه موصل نوع p .

(٤) الجهد الأمامى لوصلة pn .

٢ - أجب عن الأسئلة الآتية الخاصة بدائرة الثنائيات المبينة في الشكل ٦ - ٧٦ :



الشكل ٦ - ٧٦ دائرة ثنائيات

(١) اذكر اسم الدائرة .

(٢) ارسم الشكل الموجي للخرج عند توصيل جهد الدخل المبين في

الشكل ٦ - ٧٦ (ب) .

(٣) كيف يمكن التخلص من التموجات ؟

(٤) احسب قيمة تردد تموجات الخرج اذا كان تردد الدخل 50 هرتز .

(٥) احسب أقصى قيمة لجهد الخرج إذا كانت القيمة الفعالة لجهد الدخل هي 10 فولت .

٣ - أجب عن الأسئلة الآتية الخاصة بالترانزستور المبين في الشكل ٦ - ٧٧ .

(١) اذكر نوع الترانزستور.

(٢) اذكر اسماء اطرافه .

(٣) اذكر وظيفة كل طرف .

(٤) قم بتوصيل 2 بطارية ومقاومة حمل للحصول على دائرة مكبر .

٤ - أجب عن الأسئلة الآتية الخاصة بدائرة الترانزستور المبينة في الشكل ٦ - ٧٨ .

(١) اذكر أسم دائرة الانحياز .

(٢) اذكر اسماء عناصر الدائرة .

(٣) اذكر وظيفة كل عنصر في الدائرة .

(٤) ارسم الدائرة المكافئة المبسطة .

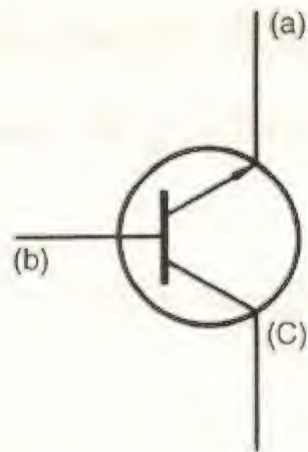
(٥) اذا كان $R_3 = 6 \text{ k } \Omega$, $h_{fe} = 150$, $h_{ie} = 4 \text{ k } \Omega$. احسب درجة

تكبير الجهد A_V والكسب G_V [dB] .

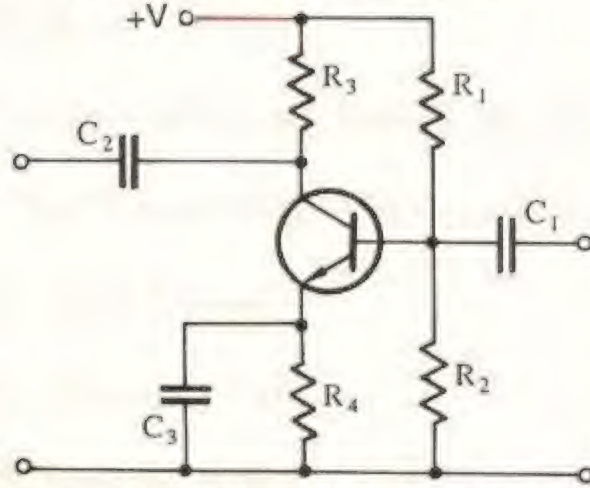
٥ - قارن بين دوائر مكبرات صنف (أ) وصنف (ب) وصنف (ج) .

٦ - اشرح وظيفة دائرة الازدواج .

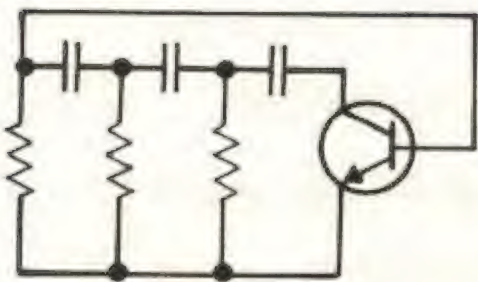
٧ - اذكر اسم كل من دوائر المذبذب الموضحة في الشكل ٦ - ٧٩ .



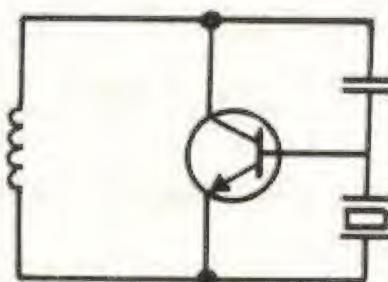
الشكل ٦ - ٧٧ ترانزستور



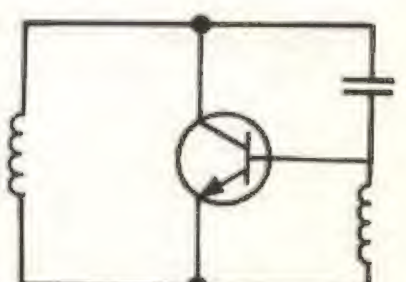
الشكل ٦ - ٧٨ دائرة ترانزستور



(أ)



(ب)



(ج)

الشكل ٦ - ٧٩ بوابر مذبذب

٨ - اذكر استخدامات الأدوات شبه الموصلة الآتية :

(١) ثنائي منظم الجهد .

(٢) الثنائي الباعث للضوء .

(٣) ثنائي المكثف المتغير .

(٤) الثرميستور .

(٥) أداة هول .

(٦) الثايرستور .

٩ - اذكر أسماء أطراف ترانزستور تأثير المجال (FET) وشرح وظائف هذه الأطراف.

١٠ - أكمل جدول القيم المنطقية التالي :

الدخل		الخرج					
A	B	A.B	\overline{B}	A+B	\overline{A}	$\overline{A}.\overline{B}$	$\overline{A}+\overline{B}$
0	0						
0	1						
1	0						
1	1						

الفصل السابع

أساسيات التحكم الإلكتروني

Fundamentals of electronic control

تُستخدم أجهزة التحكم الإلكتروني المختلفة في كل الأجهزة ، مثل الإنسان الآلي وأدوات الماكينات في المصانع ، والغسالات الأتوماتيكية في المنازل والسيارات . ولهذا يمكن القول ان العصر الحالي هو عصر التحكم الإلكتروني ، وإنه من المتوقع في المستقبل أن يستمر هذا الاتجاه بقوة .

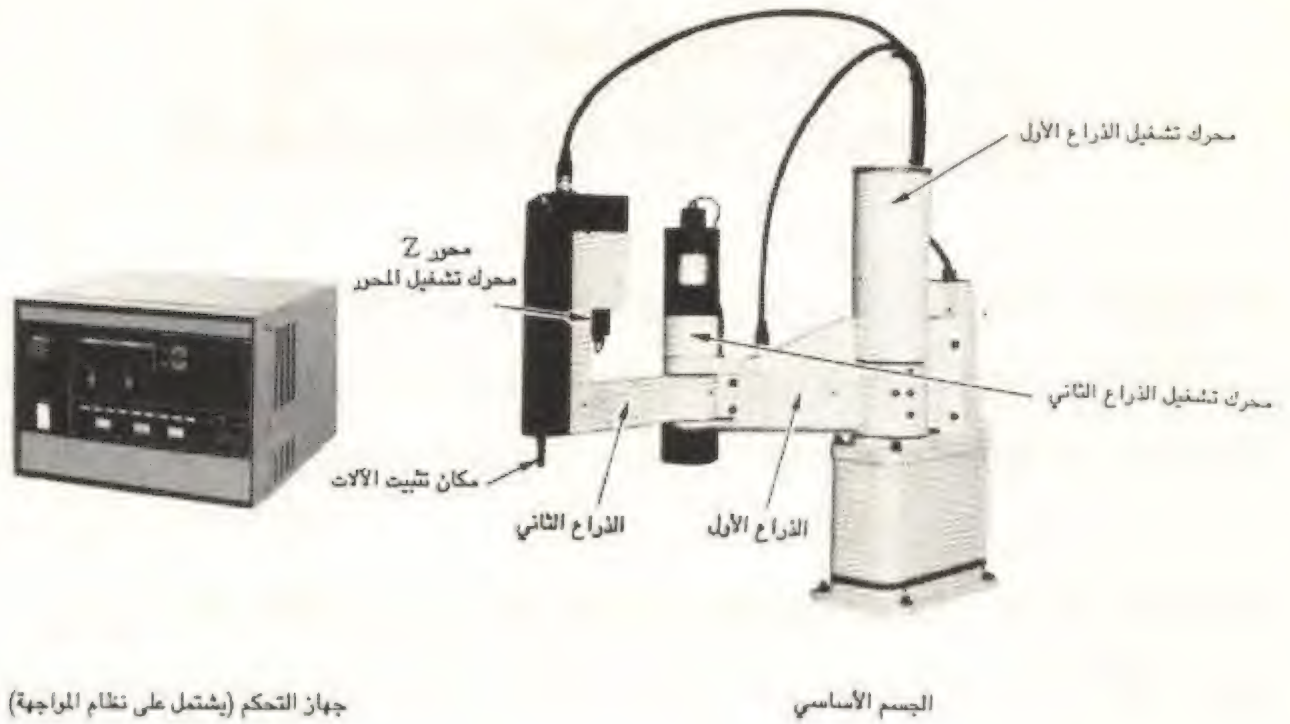
ويحتاج التحكم الإلكتروني إلى أجهزة إحساس بالضوء والحرارة ، ومحثات (مشغلات) للسولينويد المغناطيسية والمحركات ، ومواءمات في المحولات الرقمية / التمثيلية ودوائر التحويل من التوازي إلى التوالي ، وأنظمة التحكم على التوالي والتحكم بالتغذية الراجعة . في هذا الفصل ، سندرس أساسيات طرق التحكم الإلكتروني، وكذلك الاستخدامات العملية لأنظمة التحكم الإلكتروني البسيطة .

٧ - ١ أنواع ومكونات أنظمة التحكم Control system

٧ - ١ - ١ تركيب أنظمة التحكم

يوضح الشكل ٧ - ١ مثلاً لإنسان آلي يستخدم للتجميع حيث يتم توصيل جهاز يتحكم في هذا الانسان الآلي عن طريق كابل ، وبعد تثبيت يد ماسكة إلى الإنسان الآلي ، يتم تحويل وإمداد الأجزاء وبعض الأعمال الأخرى أتماتيكياً بواسطة الإنسان الآلي وذلك بإرسال إشارة من الحاسوب إلى المتحكم (جهاز التحكم) .

بالإضافة إلى ذلك فإن توصيل كاميرا لاكتشاف الأشياء تجعل الإنسان الآلي يميز مكانها وشكلها .

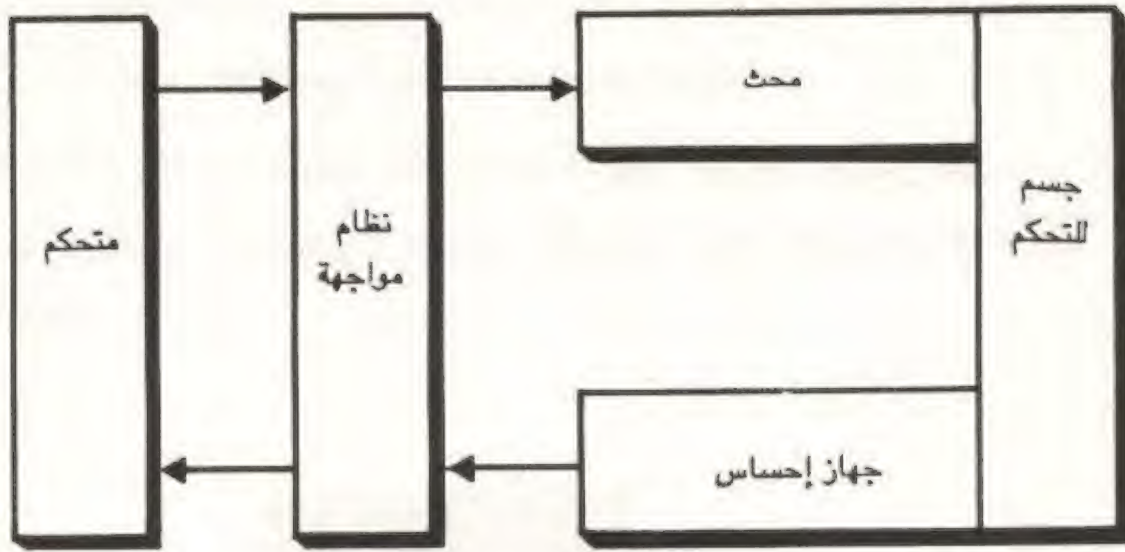


الشكل ٧ - ١ الإنسان الآلي

ويبين الشكل ٧ - ٢ العناصر الأساسية لتركيبات وأجهزة ضبط أتوماتيكية وكذلك للإنسان الآلي .

ويمكن لجهاز الإحساس أن يكتشف معلومات عن مكان الشيء وشكله ، وكذلك متغيرات طبيعية مثل الحرارة والضغط . والمتحكم هو جهاز يحلل المعلومات التي تم الحصول عليها بواسطة جهاز الإحساس ويرسل إشارات تحكم .

ونظام المواجهة Interface هو الجهاز الذي يتوسط في تحويل الإشارات التي تم الحصول عليها بواسطة جهاز الإحساس حتى يسهل على المتحكم معالجتها .



الشكل ٧ - ٢ مخطط صندوقي لنظام تحكم

أما المحث فهو جهاز يجعل الآلة تعمل لتمسك الشيء وتحمله بإشارة من المتحكم . ويدخل نظام المواجهة أيضاً بين المتحكم والمحث . وهناك حقائق كثيرة ونظريات سبق دراستها طبقت على أجهزة الإحساس وأجهزة التحكم والمحثات .

٧ - ١ - ٢ التحكم المتتابع Sequential control والتحكم بالتغذية الراجعة

التحكم يعنى تنفيذ عملية مطلوبة على أشياء معينة عند الضرورة. ولهذا الغرض ، فإن التحكم يشتمل على التحكم المتتابع الذي يحقق عمليات متوالية معينة، والتحكم بالتغذية الراجعة لتحقيق أشياء مرغوب فيها.

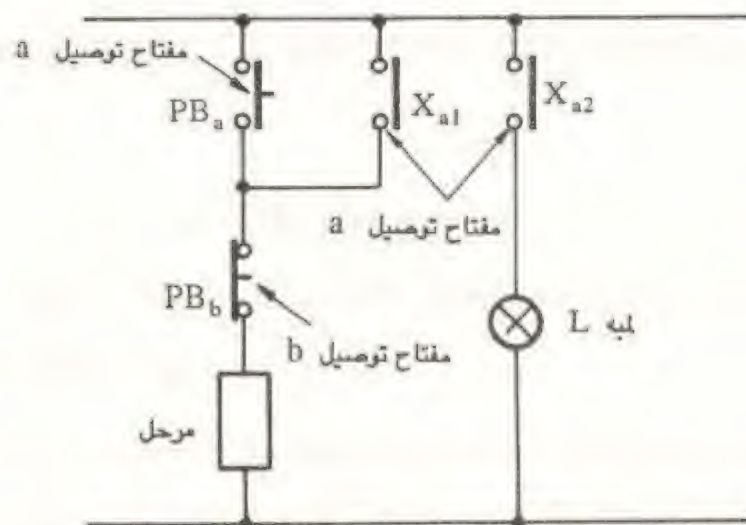
وفي التحكم المتتابع ، يتم تنفيذ كل خطوة من عملية التحكم على التوالي باتباع ترتيبات وشروط موضوعة مسبقاً . بعد الضغط على مفتاح البدء في التحكم المتتابع ، تعالج أجهزة التحكم كل الخطوات وفقاً لإجراءات قد تعلمها الجهاز . وفى أجهزة التحكم ، تستخدم

مرحلات لتشغيل وإيقاف الدائرة الكهربائية، وكذلك مؤقتات (أجهزة توقيت) . و يبين الشكل ٧ - ٣ المظهر الخارجي لمرحل ومؤقت (جهاز توقيت).

وكما درسنا بالفعل ، تشتمل نقط تلامس المرحل على نقط تلامس التشغيل، التي تقفل الدائرة عندما يسرى تيار كهربائي في ملف التشغيل، ونقط تلامس الإيقاف أو نقط تلامس b التي تفتحها .



الشكل ٧-٣ المرحل (على اليسار) وجهاز التوقيت (على اليمين)



الشكل ٧-٤ دائرة مسك ذاتي Self holding circuit

ويبين الشكل ٧ - ٤ دائرة مسك ذاتى تستخدم كدائرة بدء لمحرك . عندما يضغط على زر الدفع PBa ، تضيق اللمبة L ، وتطفأ اللمبة بالضغط على PBb .
 وحالياً ، تستخدم مراحل بدون نقط تلامس بصورة شائعة . وعلى الجانب الآخر ، يقارن التحكم بالتغذية الراجعة خرج الشيء بقيمة مرغوبة ويحاول أن يطابقهما .
 كما يبين الشكل ٧ - ٥ تركيب تحكم الحرارة لسخان كهربائي كمثال على التحكم بالتغذية الراجعة . والمعدن المزدوج الذي سوف نتعرض له فيما بعد ، ينثنى ويفتح موصل دائرة سلك كهروحرارى عندما ترتفع درجة الحرارة ، والذي ينتج عنه عدم سريان تيار كهربائي إلى السلك الكهروحرارى . وعندما تنخفض درجة الحرارة ، يقفل الموصل ، فينتج عنه سريان تيار كهربائي إلى السلك الكهروحرارى مرة أخرى . ولهذا ، فإنه في التحكم بالتغذية الراجعة يشاهد المتغير تحكم دائم أثناء عملية التحكم .



الشكل ٧ - ٥ المخطط الصندوقى لنظام تحكم بتغذية راجعة

٧ - ١ - ٣ المحس (جهاز الإحساس) Sensor

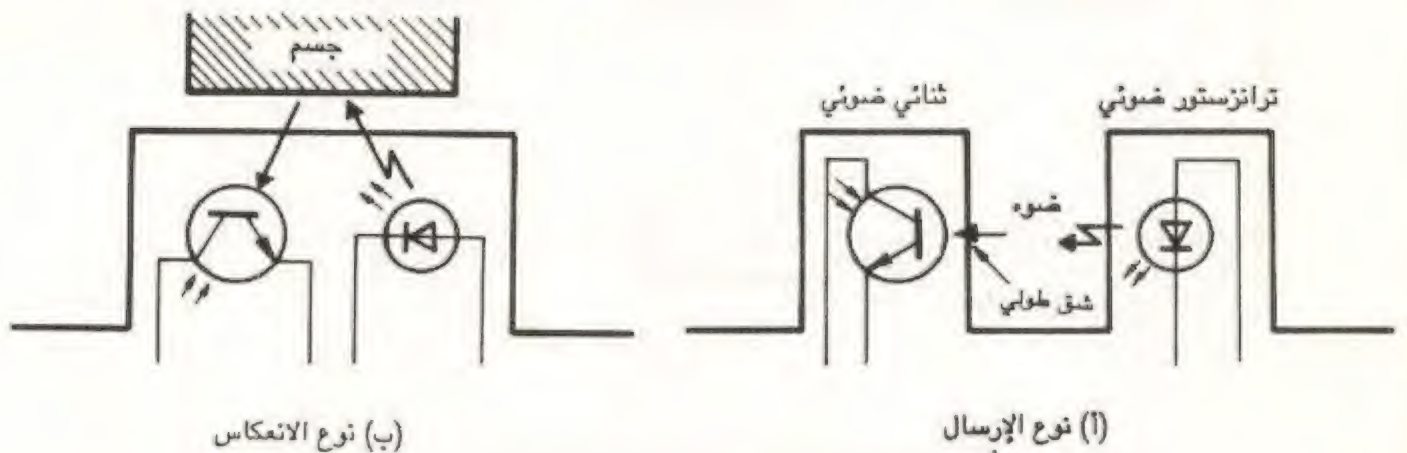
بالنسبة للمتحكم ، يستخدم جهاز إلكتروني مثل جهاز الحاسوب الصغير . ولهذا فإن المحسات المستخدمة يجب أن تكون هي تلك التي تحول المتغيرات الطبيعية إلى جهد كهربائي أو تلك التي تكتشف إما وجود إشارة كهربائية أو غيابها . وفيما يلي عرض لمحسات مختلفة .

١ - محس باستخدام الضوء (محس ضوئي) Sensor using light

إن جميع الترانزستور الضوئي الذي يسرى فيه تيار كهربائي عند إشعاع الضوء وثنائي البعث الضوئي يسمح باكتشاف مرور واقترب الشيء ، ويبين الشكل ٧ - ٦ مثلاً لذلك .

وفي الشكل ٧ - ٦ (أ) ينقطع الضوء عندما يمر شيء خلال شق طولي ليمنع سريان تيار مجمع الترانزستور . وفي الشكل ٧ - ٦ (ب) ، يسرى تيار مجمع الترانزستور بواسطة الضوء المنعكس على شيء مقرب .

وبالإضافة إلى ذلك ، هناك الثنائيات الضوئية وخلايا الجهد الضوئي وخلايا التوصيل الضوئي التي تقل مقاومتها بالضوء المشع . وتستخدم هذه الأنواع في الأبواب الأتوماتيكية للأتوبيسات والمصاعد ، والمفاتيح الأتوماتيكية وغير ذلك .

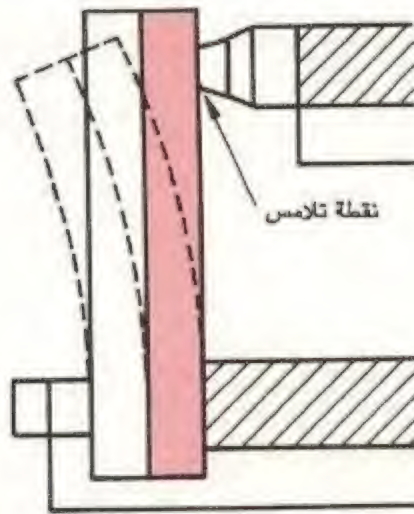


الشكل ٧-٦ المحسات باستخدام الضوء .

ب - محس الحرارة Temperature sensor

يستخدم الازدواج الحراري كمحس لدرجة الحرارة على أساس خاصية الزيادة في القوة الدافعة الكهروحرارية الناتجة من ارتفاع درجة الحرارة في نقط التلامس الساخنة .
الثرمستور الذي تقل مقاومته بارتفاع درجة الحرارة ، يستخدم كمحس لدرجة الحرارة .
ولهذا تضاف دائرة تعويض لأن المقاومة لا تقل خطياً عما هي عليه .

وفى المعدن المزدوج المستخدم للتحكم في درجة حرارة السخان الكهربائي ، يلصق لوحين معدنيين لهما معاملات تمدد خطية مختلفة لتوصيل وفصل دائرة على أساس انثناء اللوحين المعدنيين وفقاً لارتفاع درجة الحرارة . ويبين الشكل ٧ - ٧ الشكل الرئيسى للمعدن المزدوج .
ويستخدم محس الحرارة لأغراض مختلفة منها على سبيل المثال تكييف الهواء وتنظيم درجة حرارة الفرن .



الشكل ٧ - ٧ المعدن المزدوج Bimetal

ج - محس باستخدام المغناطيسية Sensor using magnetism

عنصر هول هو محس تمثيلي لاستخدام المغناطيسية . فعنصر هول هو جهاز شبه موصل مع تطبيق ظاهرة توليد الجهد الكهربائي في اتجاه عمودي على كل من التيار والمجال

المغناطيسي. وعندما يسري تيار في موصل، ويسلط مجال مغناطيسي عمودي على التيار؛ فإن جهد الخرج من عنصر هول يكون عدة عشرات الميلي فولت، ويعبر عنه بالمعادلة الآتية:

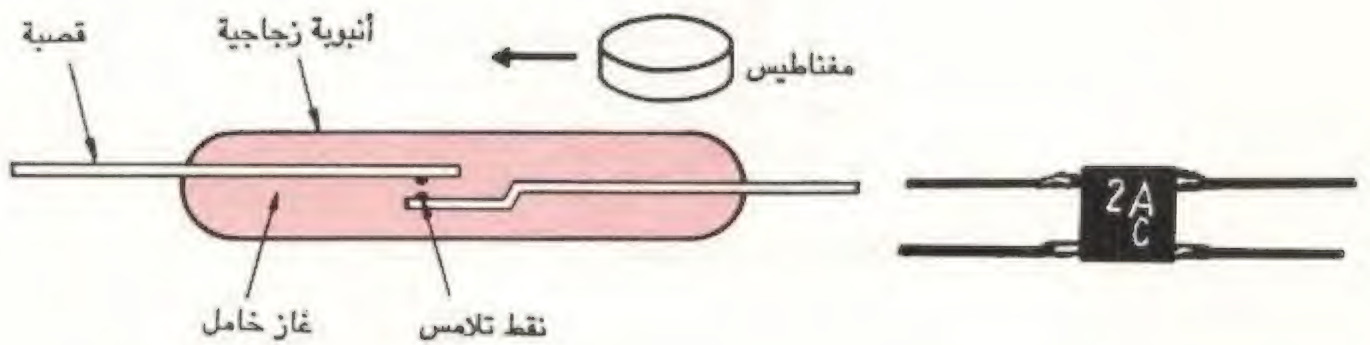
$$V_H = kIB [V]$$

حيث k : ثابت و I هو شدة التيار، و B { تسلا } هو كثافة تدفق المجال

المغناطيسي.

وفي عنصر هول، يتناسب جهد الخرج مع كثافة التدفق المغناطيسية B ، ويستخدم العنصر في أجهزة قياس التدفق المغناطيسي وبتجميعه مع مغناطيس يستخدم في اكتشاف مواقع الأشياء.

كما يستخدم مفتاح القسبة بتجميعه مع مغناطيس غالباً لاكتشاف إقتراب الشيء. ويبين الشكل ٧-٩ تركيب مفتاح القسبة. ويحدث تمغنط لنقط التلامس باقتراب مغناطيس، وتثقل الدائرة بالقوة الجاذبة. ونقط التلامس المتميزة بالمرونة تغلق وتفتح لحظياً (عدة ميلي ثانية) بمجال مغناطيسي خارجي وبدونه.

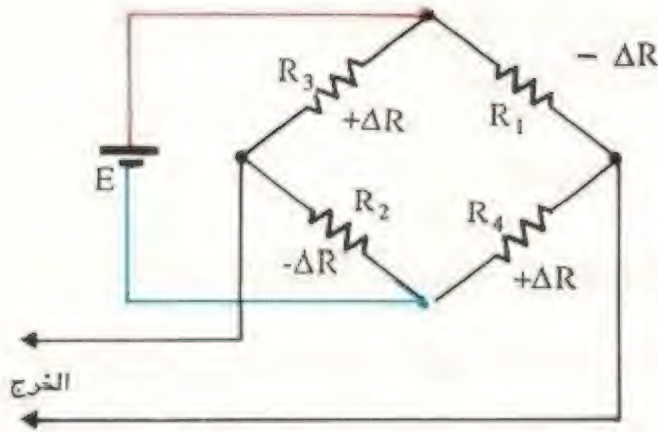


الشكل ٧-٨ عنصر هول

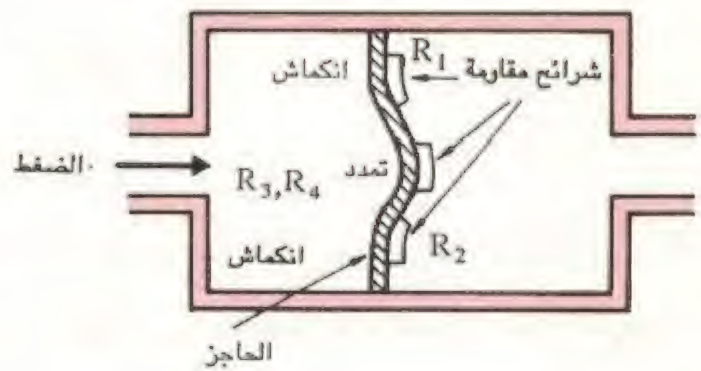
الشكل ٧-٩ مفتاح القسبة

د - محس الضغط Pressure sensor

لكي يكتشف محس الضغط ضغط الهواء ، وضغط الزيت، وغير ذلك ؛ فإنه يستخدم غالباً مقياس ضغط سلكى . ويبين الشكل ٧-١٠ الفكرة الأساسية لمحس ضغط من نوع مقياس الضغط السلكى . كما يوضح الشكل أن تسليط الضغط يجعل الحاجز الملتصق بشريحة مقاومة يتشوه ليغير قيمة المقاومة للشريحة نفسها . ثم تكتشف هذه المقاومة باستخدام دائرة القنطرة المبينة في الشكل ٧-١٠ (ب) وتؤخذ كجهد كهربائى .



ب - الدائرة

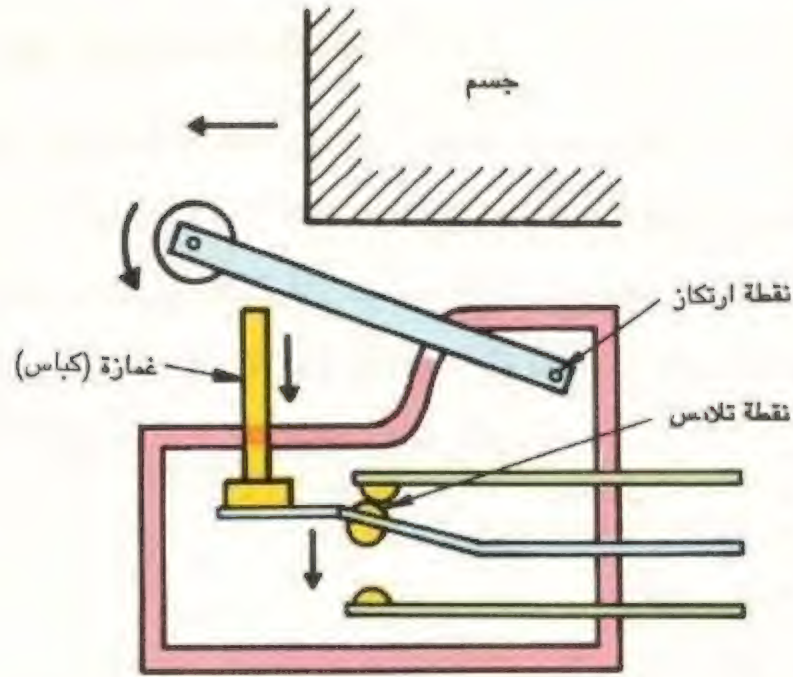


أ - مبدأ العمل

الشكل ٧-١٠ محس الضغط

هـ - مفتاح الحد Limit switch

مفتاح الحد الذى يعمل بالتلامس مع شيء يستخدم ككاشف في دوائر الحماية . ويبين الشكل ٧-١١ فكرته الأساسية ؛ فالتلامس مع الشيء يجعل الغمازة تنزل لأسفل لتغير وضع نقط التلامس الدقيقة ، التى لها آلية تأثير خطافي .



الشكل ٧-١١ مفتاح الحد

٧ - ١ - ٤ المحث (المحفز) Actuator

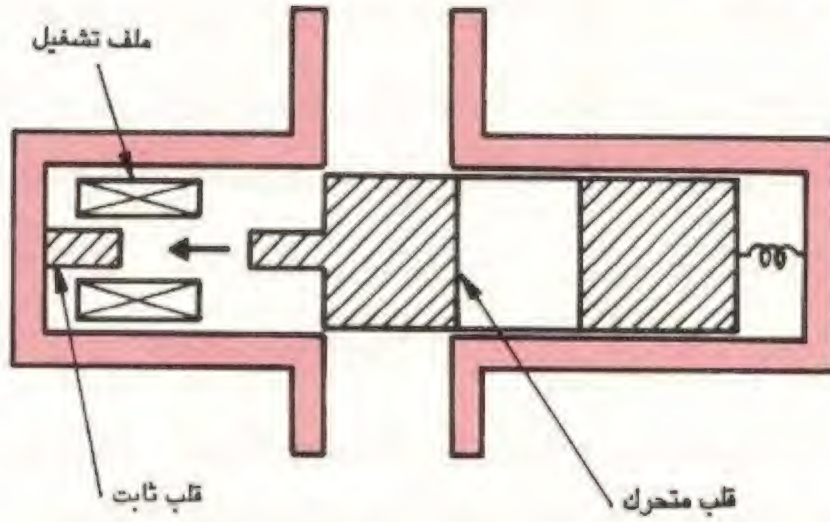
المحث هو الجزء الذي يشغل الماكينة بإشارة تحكم من المتحكم . وهو ينفذ عملية بسيطة مثل الدوران والحركة الخطية . وتجميع بعض المحثات مع عناصر نقل الحركة مثل التروس واللواكب الكروية وكذلك الكامات تسمح بعمليات دقيقة ومعقدة . وفيما يلي فكرة عمل المحثات شائعة الاستخدام .

١- السولينويد (الملف اللولبي) Solenoid

يستخدم السولينويد فعل الجاذبية لمغناطيس كهربائي موضوع أمام شريحة حديدية . ويمكن استخدام قوة جذب المغناطيسات الكهربائية مباشرة . بالإضافة إلى ذلك ، وكما هو مبين في الشكل ٧-١٢ ، فإن السولينويد يستخدم غالباً في دائرة ضغط الهواء أو الزيت . ويؤدي السولينويد حركة تبادلية فقط بين نقطتين وينقصه التحكم في السرعة ، ومع ذلك فالسولينويد واسع الانتشار لأنه رخيص .

ب - المحرك النبضي Pulse motor

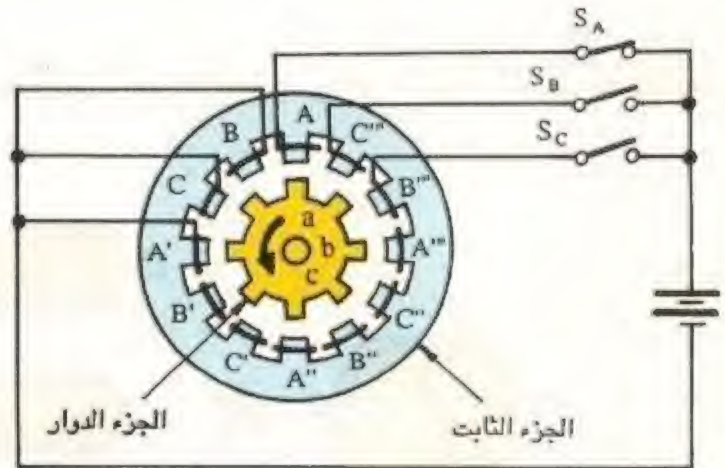
المحرك الذي يدور بقوة كهرومغناطيسية يستخدم بكثرة في المحثات . ويحتاج المحرك الذي يستخدم في المحثات إلى تحكم دقيق في الدوران وله مواصفات مختلفة بالمقارنة بمحركات القدرة ذات الاستخدام العام .



الشكل ٧-١٢ السولينويد (الملف اللولبي)



ب - المظهر الخارجي



أ - الفكرة

الشكل ٧-١٣ المحرك النبضي

المحرك النبضي أو المحرك ذو الخطوة يدور بزاوية معينة ، على سبيل المثال 1.8 درجة ، مع كل نبضة ترسل . والشكل ٧-١٣ (أ) يوضح الفكرة الأساسية ، فعندما يسري التيار الكهربائي في لفات الجزء الثابت A , B , C واحدة بعد الأخرى ، يسحب قطب الجزء المتحرك ليدور في اتجاه السهم المبين بالشكل زاوية ثابتة كل مرة ، ويسمح تغيير ترتيب التيار المار في لفات الجزء المتحرك بالدوران في اتجاه عقارب الساعة أو ضد عقارب الساعة .

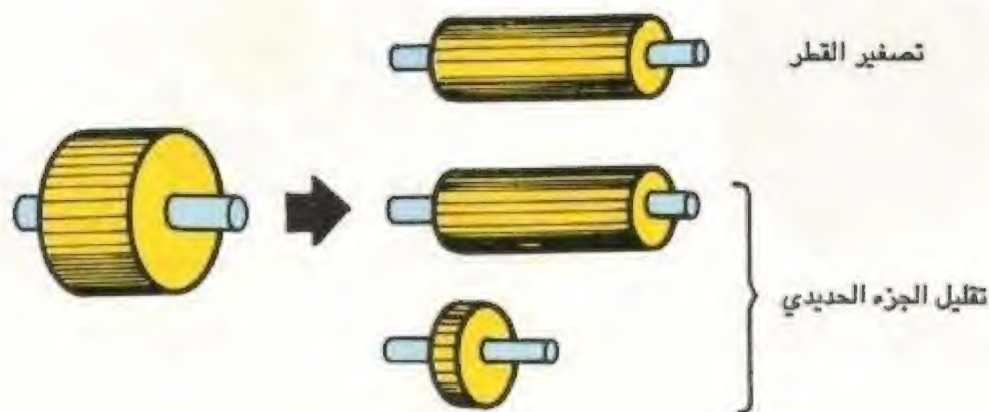
وزاوية الخطوة هي زاوية الدوران لكل نبضة ؛ بافتراض أن زاوية الخطوة هي A^0 لكل نبضة ، وعدد النبضات الداخلة تساوي n ، إذن يمكننا التعبير عن زاوية الدوران θ بالعلاقة:

$$\theta = A_n [0]$$

ح - محرك السيرفو Servomotor

حيث إن لمحرك الخطوة قوة تشغيل صغيرة ، لهذا يستخدم محرك السيرفو في الإنسان الآلي الصناعي بسبب قوة تشغيله الكبيرة، وكذلك إمكانية التحكم فيه جيداً . وأساس عمله مثل أساس عمل المحرك العام . إلا أنه قد أدخلت تحسينات لتناسب التحكم بدقة عالية والسرعة العالية والتردد العالي كما يلي :

١ - كما هو مبين بالشكل ٧ - ١٤ ، يخفض الجزء الحديدي من الجزء المتحرك لتزويد العجلة والإعاقه .



الشكل ٧-١٤ كيفية تحسين معدل العجلة

٢ - يخفض عدد اللفات لتحسين الاستجابة .

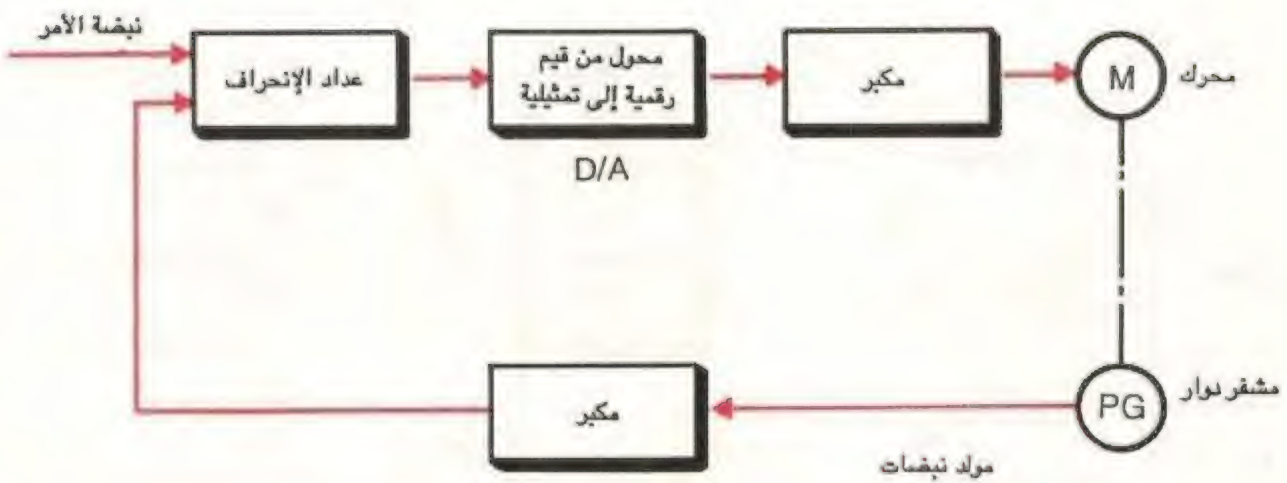
٣ - استخدام قلب حديدي ذي خاصية تشبع مغناطيسي عالية لتزويد الخرج .

٤ - كما هو مبين بالشكل ٧-١٥ ، يعطى الذراع المتحرك فتحات مائلة لإزالة العزم غير المنتظم .

ويمكن إدارة محركات السيرفو بزاوية موجهة (نبضة) فقط بواسطة تثبيت مكتشف زاوية الدوران المسمى بالمشفر الدوار إلى محور الجزء المتحرك للمحرك . ويبين الشكل ٧-١٦ مثلاً لميكانيكية السيرفو .



الشكل ٧-١٥ الفتحات المائلة



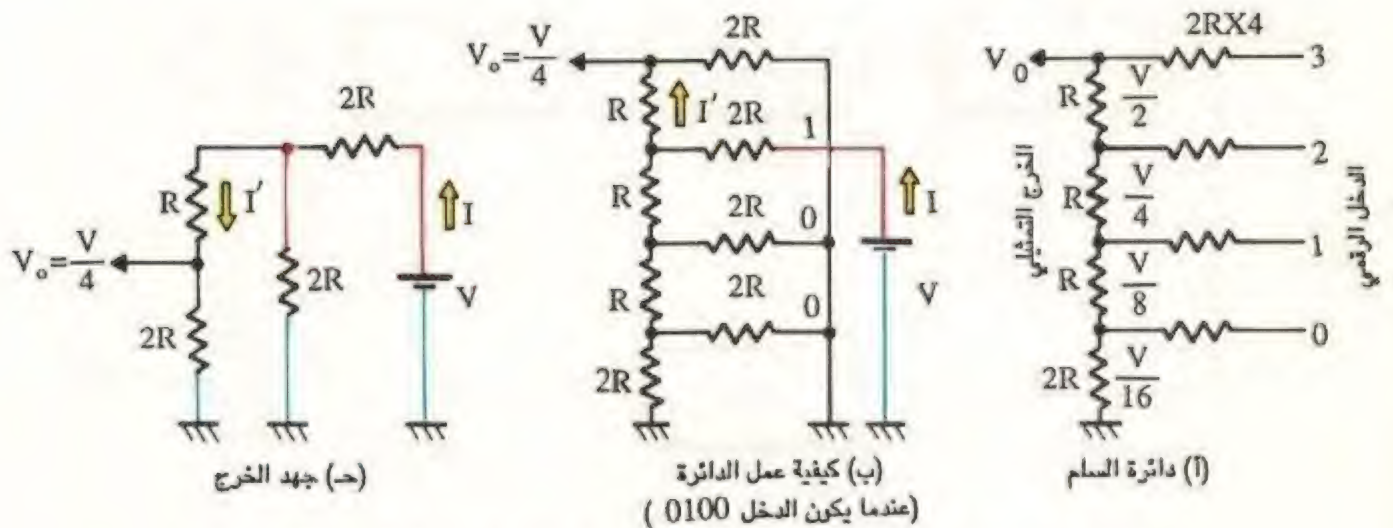
الشكل ٧-١٦ المخطط الصندوقي لميكانيكية السيرفو

تتكامل النبضات في عداد الانحراف بعد وصول نبضة الأمر . وتحول النبضة المتكاملة إلى جهد كهربائي مستمر بواسطة المحول الرقمي / التمثيلي لتكبيرها وتضاف إلى المحرك . يولد دوران المحرك نبضات مع المشفر الدوار المثبت في المحور الدوار للمحرك . تطرح هذه النبضات النبضة المتكاملة في عداد الانحراف ، عندما يصبح عدد النبضات صفراً ، ويقف دوران المحرك .

٧ - ١ - ٥ نظام المواجهة Interface

على الرغم من أن المحس ينتج جهداً كهربائياً صغيراً جداً ، فإن المحثات المشغلة تحتاج لتيار كبير . والمتحكم شائع الاستخدام هو متحكم رقمي ، يحتاج إلى ميكروكمبيوتر ذي كفاءة من 4 إلى 16 رقم ثنائي . هنا 5 فولت و 0 فولت تناظر "1" و "0" في الأرقام الثنائية . لهذا ، فنظام المواجهة التي تشتمل على التحويل المتبادل تتركب في نظام التحكم الإلكتروني وذلك من أجل الربط السهل بين الوحدات . ونظام المواجهة هي مجموعة من الدوائر الكهربائية والأجهزة المركبة للتنظيم بين نظامين أو أكثر .

وفيما يلي الدوائر الرئيسة لنظام المواجهة .



الشكل ٧-١٧ فكرة المحول الرقمي / التمثيلي (A - D)

أ- المحول الرقمي / التمثيلي (D - A Converter)

المحول الرقمي / التمثيلي هو دائرة لتحويل الإشارات الرقمية من "1" و "0" إلى جهد كهربائي ذات قيمة مستمرة متغيرة ويبين الشكل ٧-١٧ الفكرة الرئيسية للمحول الرقمي التمثيلي (D - A). ودائرة تقسيم الجهد من نوع المقاومة المبينة في الشكل ٧-١٧ تسمى دائرة السلم وتستخدم في المحول الرقمي / التمثيلي ذي الأرقام الأربعة الثنائية. والنوائر المبينة في الأشكال ٧-١٧ (ب)، (ج) مبنية على أساس إشارة رقمية (0100).
ويحسب جهد الخرج كمايلي :

المقاومة الكلية

$$R_0 = 2R + \frac{6R^2}{5R} = \frac{16R}{5}$$

التيار الكلي :

$$I = \frac{V}{R_0} = \frac{5V}{16R}$$

تيار الخرج

$$I' = I \times \frac{2R}{5R} = \frac{V}{8R}$$

جهد الخرج :

$$V_0 = I' \times 2R = \frac{V}{4}$$

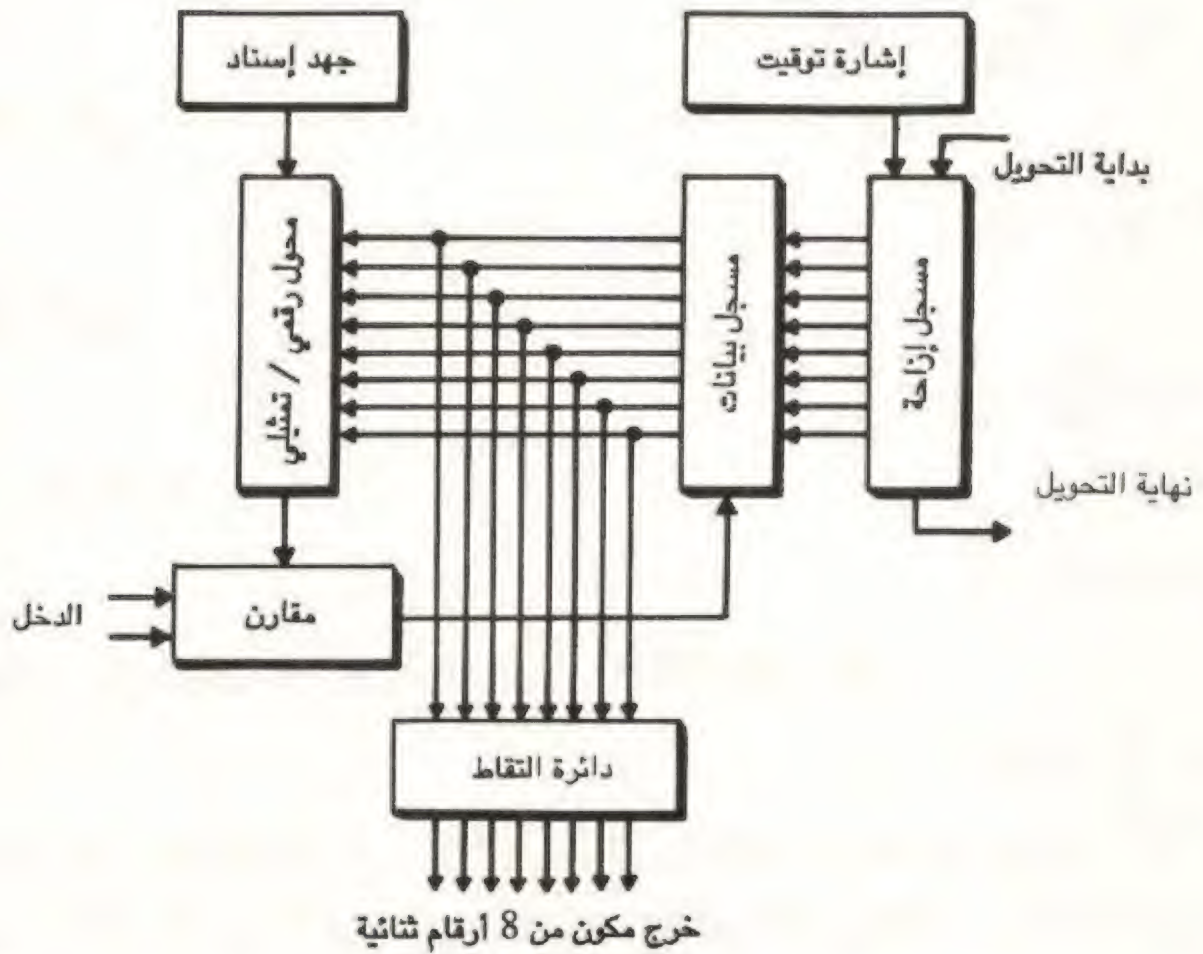
ولهذا ، عندما يكون $V = 5V$ والداخل هو 0100، يكون الخرج

$$V_0 = \frac{V}{4} = 1.25 V$$

كما هو مبين بالشكل ٧-١٧ (أ) ، أعلى رقم ثنائي في الدخل يؤول إلى $V/2$ في الخرج ، والرقم الثنائي الثاني يعطي نصف الرقم الثنائي الأسبق وهكذا . ودائرة السلم ذات الأرقام الثنائية يمكن عملها أيضاً بالطريقة نفسها .

ب- المحول التمثيلي / الرقمي (A - D Converter)

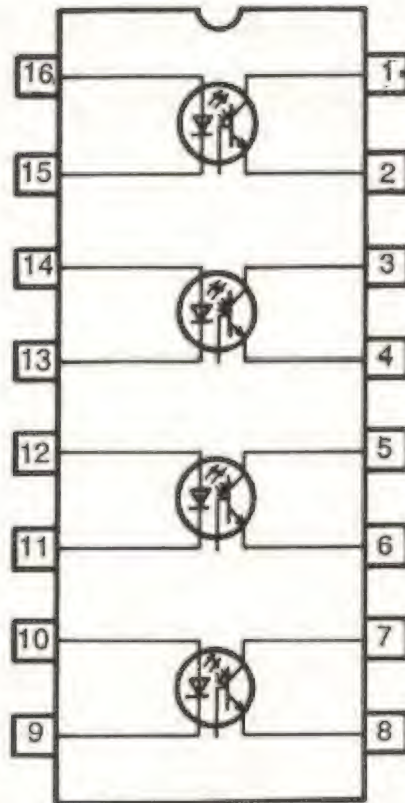
المحول التمثيلي / الرقمي هو دائرة لتحويل الجهد الكهربائي الناتج من محس إلى متغير رقمي مكون من أرقام ثنائية . بالوجود مع محول رقمي / تمثيلي ، صنعت الدائرة المبينة في الشكل ٧-١٨ في دائرة متكاملة . ويسلط الجهد التمثيلي من المحول الرقمي / التمثيلي إلى المقارن حتى يصبح الجهد التمثيلي مساوياً لجهد الدخل . وفي هذه اللحظة تؤخذ الإشارة الرقمية لتعمل التحويل من تمثيلي إلى رقمي . المحول التمثيلي / الرقمي ذو الأرقام الـ 8 يمكنه فصل جهد الدخل إلى 256 نوعاً من الإشارة الرقمية .



الشكل ٧-١٨ التركيب الداخلي لدائرة متكاملة (IC) مستخدمة للتحويل التمثيلي/الرقمي (A-D)

ح - نظام مواجهة معزول

في نظام المواجهة المعزول ، تحول الإشارة الكهربائية إلى الضوء باستخدام ثنائي باعث للضوء ، ثم يستقبل الضوء بواسطة ترانزستور ضوئي ، ويحول إلى إشارة كهربائية مرة أخرى للإرسال . وحيث إن الدخول والخرج معزولان كهربائياً للحماية من زيادة الجهد ، فإن نظام المواجهة المعزول هذا شائع الاستخدام في أجهزة التحكم . ويبين الشكل ٧-١٩ مثلاً يسمى الرابط الضوئي .



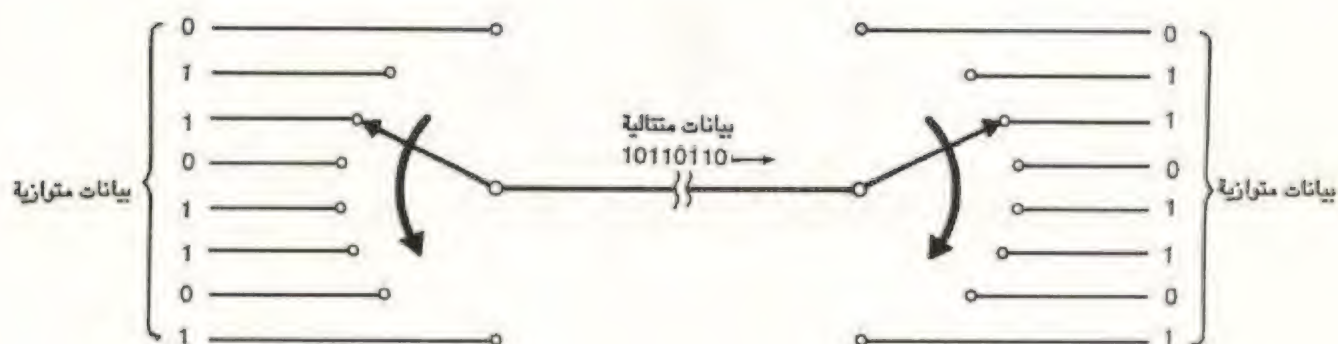
الشكل ٧-١٩ الرابط الضوئي Photo coupler

د - دائرة التحويل من التوازي إلى التوالي

في الحاسوب الصغير المستخدم للتحكم ، تعالج إشارات الأرقام الثنائية على التوازي ، بينما يستخدم في الخطوط التلفونية سلكان لإرسال واستقبال الإشارات ، وحتى يكون إرسال

وإستقبال إشارات الحاسوب باستخدام الخطوط التلفونية ممكناً ، يحتاج الأمر إلى دائرة لتحويل الإشارات المتوازية إلى إشارات متتالية بالتبادل ، وتسمى هذه الدائرة بدائرة التحويل من التوازي إلى التوالي وتصنع كدائرة متكاملة . ويبين الشكل ٧-٢٠ الفكرة الأساسية لها .

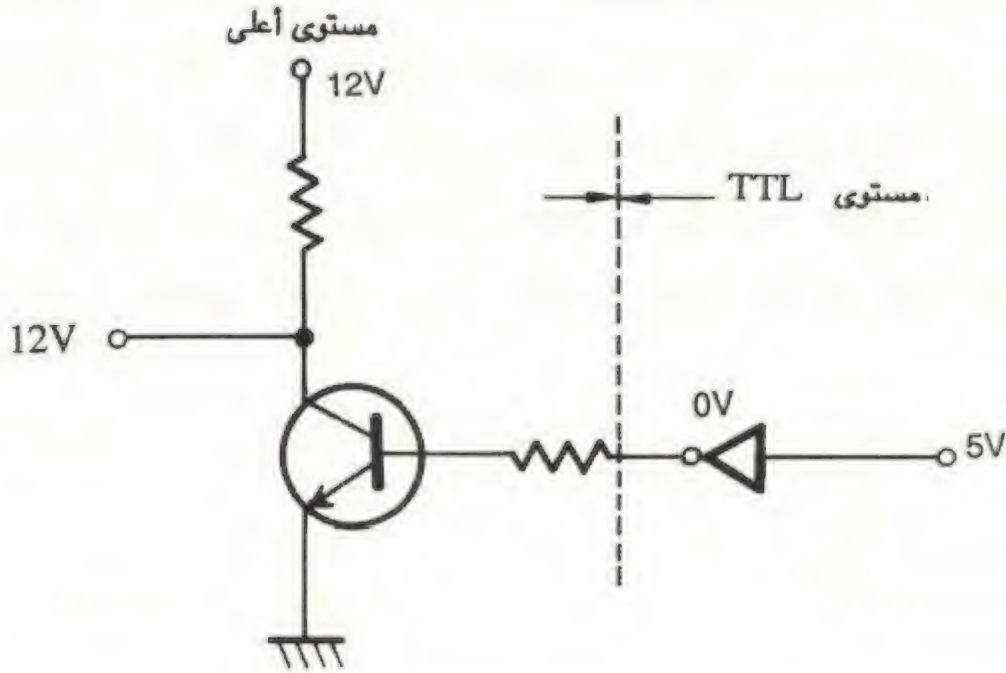
في الشكل ٧-٢٠ ، عندما يدور المفتاحان على اليسار وعلى اليمين بالسرعة نفسها تصبح البيانات المتوازنة المكونة من 8 أرقام ثنائية على الجانب الأيسر بيانات متتالية مبنية في منتصف الشكل وذلك بتأثير تغيير التوصيل . وعلى الجانب الآخر ، تحول البيانات المتتالية في الجانب الأيمن إلى بيانات متوازية بالطريقة نفسها . العملية التي تتم في الجانب الأيسر تسمى التحويل من توازي إلى توالي، وتلك التي تتم في الجانب الأيمن تسمى التحويل من توالي إلى توازي .



الشكل ٧-٢٠ التحويل من توازي إلى توالي

هـ - تحويل مستوى الإشارة Signal level conversion

عندما يكون مستوى الجهد الكهربائي للمتحكم 5 فولت و 0 فولت ، فإن التوصيل إلى جهاز آخر ذي مستوى جهد كهربائي مختلف يحتاج إلى دائرة نظام مواجهة لتحويل مستوى الإشارة .



الشكل ٧-٢١ تحويل مستوى الإشارة

ويبين الشكل ٧-٢١ مثلاً لنظام المواجهة للتحويل إلى مستوى جهد أعلى . وكما يتبين من الشكل ، فإن إشارة الدخل وهي 5 فولت تصبح (صفراً) فولت عندما تخرج من دائرة NOT ، وذلك يمنع مرور التيار إلى الترانزستور فيسمح بأخذ 12 فولت في الخرج .

٧ - ٢ التحكم الإلكتروني العملي

الحواسيب والمعالجات المتتابعة تستخدم لتشغيل أجهزة التحكم الإلكترونية . وفي هذا البند ، نقوم بشرح المعالج المتتابع الذي يسهل تداوله ويشيع استخدامه في المصانع .

٧ - ٢ - ١ المعالج المتتابع Sequencer

التحكم بالحاسوب لايسمح بفهم لغة الحاسوب واستخدام نظام المواجهة بصورة تامة . ولهذا تم اختراع وتطوير المعالجات المتتابعة للتحكم في أجهزة الحاسوب بواسطة أوامر تحكم بسيطة . والمعالج المتتابع عبارة عن متحكم قابل للبرمجة يستخدم عملياً في المصانع .

ويبين الشكل ٧-٢٢ مثالاً للمعالج المتتابع ، حيث يتكون هذا المعالج من محمل برنامج لعمل برنامج ، وذاكرة لتخزين البرنامج، ودوائر تحكم للتحكم في الدوائر الكهربائية بواسطة الذاكرة . والمعالج المتتابع قادر على التحكم المعقد ويسهل تغيير محتوياته وهو واسع الانتشار في الاستخدام . وتسمى الأجهزة من هذا النوع بجهاز التحكم القابل للبرمجة (PC) .

محمل البرنامج

ذاكرات



دائرة تحكم

الشكل ٧-٢٢ المعالج المتتابع

تمارين

١ - اشرح عمل العناصر الآتية المكونة لنظام التحكم :

- المحس - المحث (المشغل) - نظام المواجهة

٢ - اذكر نوعين من المحسات باستخدام الضوء و اشرح طريقة عملهما .

٣ - اشرح استخدام وعمل مفتاح القصبة .

٤ - إختار عبارة من المجموعة ب لها علاقة بالعبارة المقدمة في المجموعة أ :

مجموعة أ مجموعة ب

١ - محس يستخدم الضوء

أ - الحاجز

٢ - محس درجة الحرارة

ب - مفتاح الحد

٣ - محس يستخدم المغناطيسية

ج - المرحل

٤ - محس الضغط

د - ترانزستور ضوئى

٥ - محس لاكتشاف التلامس

هـ - دائرة السلم

٦ - المحول الرقمي / التمثيلي

و - محرك السرقو

٧ - نظام مواجهة معزول

ز - الرابط الضوئى

٨ - التحكم المتتابع

ح - المعدن المزدوج

٩ - التحكم بالتغذية الراجعة

ط - عنصر هول

٥ - احسب زاوية الخطوة لمحرك نبضى يدور 180 درجة في كل 100 نبضة .

٦ - على فرض أن 500 نبضة سلطت على محرك نبضى له زاوية خطوة 0.9 درجة

احسب زاوية الدوران للمحرك .

٧ - اشرح عمل نظام المواجهة المعزول .

٨ - اشرح الفرق بين التحكم المتتابع والتحكم بالتغذية الراجعة .

٩ - اشرح مميزات المعالج المتتابع .

الحمد لله تعالى الذي تتم بنعمه الصالحات
لقد وفقت بتصوير النسخة اسكندر بصورة جديده
وطباعة ممتازة

نسألكم الدعاء بظهر الغيب لي ولوالدي
اخوكم في الله أبو عبد الله عبد المهيمن فوزي

الفصل الثامن

أجهزة القياس الكهربائية

Electric Instrumentation

أغلب الظواهر الكهربائية ظواهر غير مرئية ولذلك فإن أجهزة القياس الكهربائي مثل مقياس الجهد (Voltmeter)، ومقياس التيار (Ammeter) ومقياس القدرة (Wattmeter) تستخدم في الدراسة الكمية للظواهر الكهربائية ومتابعة عمل الأجهزة الكهربائية والإلكترونية . وفى هذا الفصل سنتناول أولاً دراسة الوحدات ، والمواصفات واستخدام القيم المقاسة الضرورية لقياس المتغيرات الكهربائية، كما سندرس مبادئ عمل وتركيب وقياس بعض الأمثلة النموذجية لأجهزة القياس الكهربائية وأدوات ملاحظة الموجات .

٨ - ١ معالجة ومعايير القيم المقاسة

٨ - ١ - ١ القياس والعيارية Measurement and standard

إن قياس الطول يعني تقدير الطول كمضاعفات لوحدة قياس الطول أى المتر (m) وهذا التعريف يمكن تطبيقه أيضاً على الكميات الطبيعية الأخرى . وتصمم القياسات المعيارية الطبيعية على أساس النظام المتري وفقاً للاتفاقيات العالمية .



الشكل ٨ - ١ المقاومة القياسية

الجزء 2 يكون
داخل الجزء 1



الشكل ٨ - ٢ البطارية القياسية

وتعرف الوحدات الأخرى باستخدام بعض الوحدات الأساسية ، كوحدة قياس كمية الكهرباء (C) 1 التي تعرف بحاصل ضرب التيار في الزمن كالآتي :

$$1 [A] \times 1 [s] = 1 [A.s]$$

في الأجهزة الكهربائية التي تستخدم في قياس الكميات الطبيعية المرتبطة بالكهرباء يجب أن تكون دقة القياس طبقاً للمواصفات القياسية .

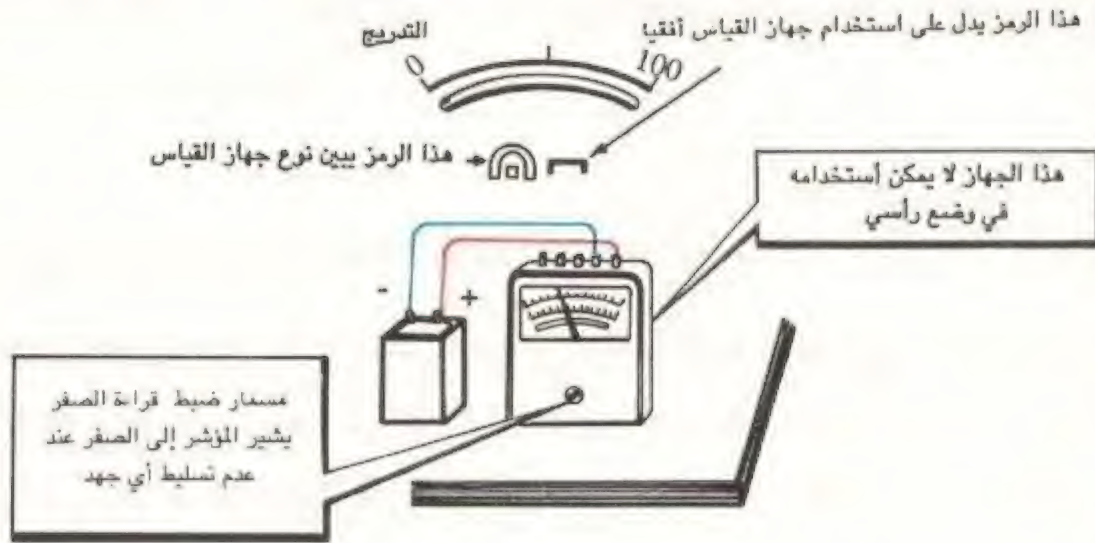
كما أن المعايير القياسية تشمل المقاومة القياسية لقياس المقاومة ، والبطارية القياسية لقياس الجهد والملف القياسي لقياس الحث ، وأيضاً المكثف القياسي لقياس السعة الكهروستاتيكية .

ويبين الشكل ٨ - ١ نموذج لمقاومة قياسية في حين يوضح الشكل ٨ - ٢ المظهر الداخلي للبطارية القياسية .

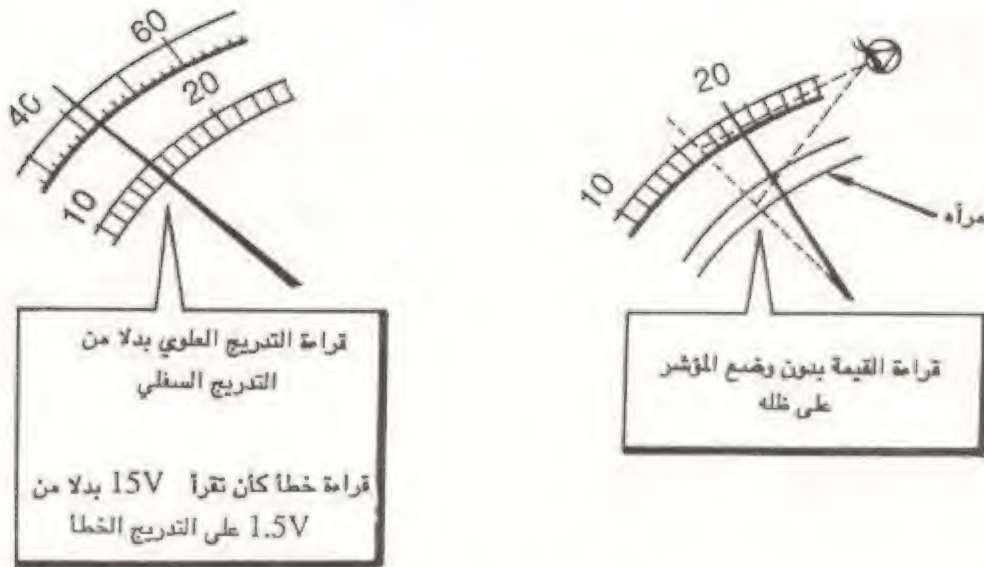
فالقوة الدافعة الكهربائية للبطارية القياسية عند $20^{\circ}C$ (عشرون درجة مئوية) على سبيل المثال تكافئ $1.01864V$

٨ - ١ - ٢ معالجة القيم المقاسة Handling of measured values

في هذا الفصل ، نتركز الدراسة على المصطلحات الفنية ووسائل تداول المقادير المقاسة التي تستخدم على نطاق واسع في القياسات الكهربائية .



الشكل ٨ - ٣ استخدام غير صحيح في استعمال أجهزة القياس



الشكل ٨ - ٤ قراءة غير صحيحة للقيمة المقاسة

١ - الخطأ Mistake

عدم دقة عامل التشغيل غير المقصودة، في قراءة القيمة المقاسة يسمى خطأ . ويجب أن يتدرب عمال التشغيل كل يوم على استخدام أجهزة القياس وقراءة التدرج .

ويوضح الشكل ٨ - ٣ كيفية استخدام أجهزة القياس الكهربائية . كما يبين الشكل ٨ - ٤ قراءة غير صحيحة للتدرج .

ب - الخطأ وتصحيحه Error and correction

إن القيمة الصحيحة للكمية المقاسة تسمى القيمة الحقيقية والقيمة الناتجة من القياسات تسمى القيمة المقاسة، والخطأ هو الفرق بين القيمة الصحيحة والقيمة المقاسة ، حيث إن القيمة الحقيقية هي قيمة مثالية ويستحيل الحصول عليها . ولهذا تعدّ القيمة القياسية التي يثبت أنها صحيحة قيمة حقيقية .

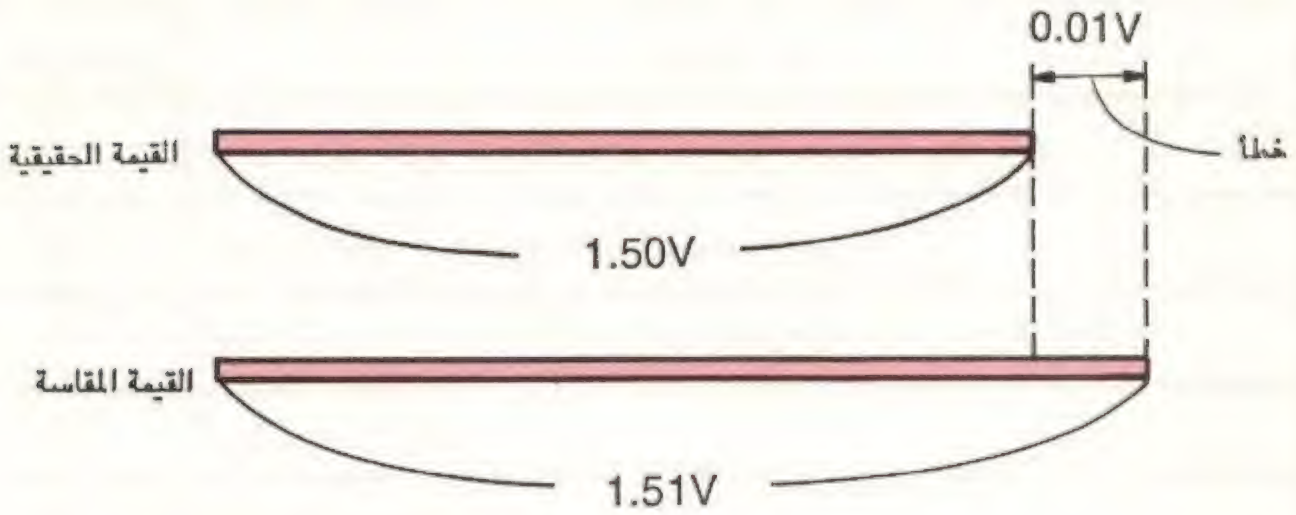
وبافتراض أن القيمة المقاسة M والقيمة الحقيقية T فإن الخطأ ϵ يكتب كالاتي :

$$\epsilon = M - T \quad (8 - 1)$$

وتكون نسبة الخطأ $\frac{\epsilon}{T}$ هي نسبة الخطأ ϵ إلى القيمة الحقيقية والنسبة المئوية لهذه النسبة تسمى بالخطأ المئوي . ومن الشكل ٨ - ٥ ، $M = 1.51V$ ، $T = 1.50V$ وهكذا فإن الخطأ ϵ يحسب كالاتي :

$$\epsilon = 1.51 - 1.50 = 0.01 V$$

$$\frac{\epsilon}{T} = \frac{0.01}{1.50} = 0.0067 = 0.67 \%$$



الشكل ٨ - ٥ القيمة الحقيقية والقيمة المقاسة

إن الفرق بين القيمة المقاسة والقيمة الحقيقية يسمى تصحيح α والنسبة α / M تسمى نسبة التصحيح ، وكذلك النسبة المئوية لهذه النسبة تسمى التصحيح المئوي .

ويعبر عن قيمة التصحيح α بالمعادلة الآتية :

$$\alpha = T - M$$

(2 - 8)

ح - خطأ أجهزة القياس

إن بيان جهاز القياس لا يمكن بالضرورة أن يظهر القيمة الحقيقية بدقة . وتصنف أجهزة القياس ذات المؤشر كما هو بالجدول ٨ - ١ على أساس مدى الخطأ المسموح وباستخدام الجدول نجد أن جهاز القياس الكهربائي تصنيف 0.5 يعطى خطأ أقل من 0.5 % من أقصى تدرج في كل جزء من التدرج .

الخطأ النسبي	الاستخدام
0.2	قياس عياري لمعايرة أجهزة القياس ذات الخطأ النسبي 0.2 (معياري ثانوي)
0.5	قياسات دقيقة . أجهزة قياس متنقلة ذات حجم قياسي
1.0	أجهزة قياس متنقلة صغيرة الحجم . أجهزة قياس ضخمة الحجم ذات لوحة مفاتيح
1.5	أجهزة قياس للصناعة
2.5	لوحة مفاتيح متعددة الأغراض

الجدول ٨ - ١ تصنيف أجهزة القياس الكهربائية ذات المؤشر بالنسبة للخطأ النسبي

في جهاز قياس الجهد (الفولتميتر) تصنيف 0.5 وأقصى قيمة للتدرج له 100V يكون الخطأ اقل من 0.5 V لأي جزء من التدرج .

د-العمليات الحسابية

تقدر المقاومة بقياس الجهد والتيار ، وفي هذه الحالة يجب تقريب النتيجة لأقرب رقم ذي معنى . مثال لذلك عند حساب قيمة مقاومة باستخدام أجهزة قياس الجهد والتيار تصنيف 0.5 فتعطي المقاومة بـ $R = 96.419 \Omega$ من القيم : $V = 75.4 V$, $I = 0.782 A$ ولكن بما أن أجهزة القياس تسمح بنسبة مئوية للخطأ 0.5 % لذلك فإن التقريب لأقرب ثلاثة أرقام يكون كافٍ ، وهو ما يجعل قيمة المقاومة 96.4Ω

وعملياً التقريب هي تلك العملية التي تقوم بتقريب العدد إلى أقرب عدد مكون من n من الأرقام بعد العلامة العشرية . ومثال لذلك إذا كانت قيمة الحد (n+1) أقل من 5 فإنها تهمل

أما إذا كانت أكبر من 5 فيقرب إلى الوحدة الأعلى . وفى حالة أن تكون قيمة العدد عند رقم الوحدة ($n + 1$) مساوية 5 فإن هذا الرقم يهمل عندما تكون n عدداً زوجياً ويقرب عندما تكون n عدداً فردياً .

هـ - الدقة والحساسية Precision and sensitivity

تعرف الدقة في القراءات بأنها درجة انحراف أو قرب القيمة المقاسة للقيمة الصحيحة .
مثال لذلك بالنسبة للقيمة المقاسة 1 V ودرجة الدقة في القياس 2mv فهذا يعني أن الخطأ $\pm 2\text{mv}$ أو أقل بين القيمة المقاسة والقيمة الحقيقية .
وتعرف الدقة بأنها درجة تجميع القيم المقاسة في قياسات متكررة . و الحساسية تعرف بأنها أقل كمية قياس يمكن أن تكتشف بالقيمة المقاسة أو هي النسبة بين تغير البيان وتغير الكمية المقاسة . ومن الأجهزة عالية الحساسية هي تلك التي تعطي زاوية دوران كبيرة مع أقل كمية مقاسة .

٨ - ٢ أجهزة القياس الكهربائية Electric measuring instruments

٨ - ٢ - ١ أنواع أجهزة القياس الكهربائية

تقوم القياسات الكهربائية بقياس الكميات الطبيعية باستخدام الطاقة الكهربائية .
وأجهزة القياس الكهربائية هي تلك الأجهزة التي تستخدم في عملية القياسات الكهربائية .
وتشمل أجهزة القياس الكهربائية أجهزة القياس التي تبين مباشرة المتغيرات الكهربائية وأجهزة الرؤية الكهربائية التي تكتشف الجهد أو التيار ، والأجهزة التي تقوم بالقياس عن طريق اجراء عمليات مختلفة .

أجهزة الرؤية الكهربائية تتكون من جلفانومترات وأجهزة قياس كهربائية وهذه الأخيرة تتضمن القناطر والمقاومات المتغيرة ورواسم الذبذبات .

وتقسم أجهزة القياس الكهربائية إلى أجهزة تمثيلية وأجهزة رقمية طبقاً لنظام المبيّنات المستخدم .

جهاز القياس	الكمية المراد قياسها	أمثلة
أجهزة قياس ذات مؤشر .	تبين الكمية الكهربائية مباشرة .	جهاز قياس الجهد، جهاز قياس التيار، جهاز قياس القدرة، جهاز قياس التردد .
أجهزة تسجيل القراءات .	تسجل الكمية الكهربائية المتغيرة .	أجهزة تسجيل القراءات .
أجهزة قياس متكاملة .	تُجمل الكمية الكهربائية خلال فترة محددة .	جهاز قياس الوات ساعة جهاز قياس الأمبير ساعة

الجدول ٨ - ٢ تصنيف أجهزة القياسات الكهربائية

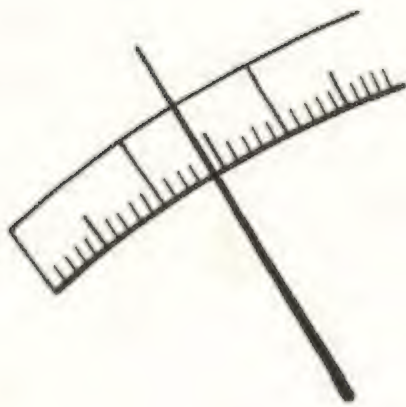
وتنقسم أجهزة القياس الكهربائية إلى أجهزة بيان القراءة ، أجهزة تسجيل وأجهزة قياس متكاملة كما هو مبين بالجدول ٨ - ٢ .

٨ - ٢ - ٢ أجهزة البيان Indicating instruments

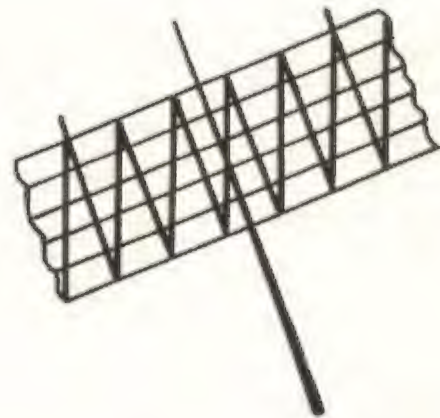
توجد أنواع مختلفة من أجهزة البيان لإظهار القراءات المباشرة للمتغيرات الكهربائية مثل الجهد والتيار . وفي هذا البند ، تعامل أجهزة الملف المتحرك كأساس لأجهزة القياس للتيار الثابت لفهم نظرية عمل أجهزة القياس الكهربائية . بعد ذلك سوف ندرس أجهزة القياس الرقمية التي تظهر القيمة المقاسة على شكل أرقام من ناحية التركيب والخواص .

أ- أنواع أجهزة القياس الكهربائية ذات المؤشر المتحرك Pointer - type

سوف نحلل هنا أجهزة القياس ذات المؤشر المستخدمة بكثرة في أجهزة القياس المباشرة ، وتسمى أجهزة القياس ذات المؤشر « بالأجهزة التمثيلية » ، التي تختلف عن أجهزة القياس الرقمية التي سوف تدرس بعد ذلك . ويقوم جهاز القياس ذو المؤشر بقياس المتغيرات الكهربائية بواسطة انحراف المؤشر على تدريج قياس .



(ب) تصنيف 0.5



(أ) تصنيف 0.2

الشكل ٨ - ٦ أمثلة للتدريج

والرموز المبينة على تدريج جهاز القياس هي رموز خاصة بنوع جهاز القياس ورمز خاص بوضع الجهاز أثناء القياس .

كما أن رموز النوع الموضحة بالجدول ٨ - ٣ تصنف على أساس نظام العمل لأجهزة القياس ذات المؤشر . وفهم نظام العمل لكل نوع من أجهزة القياس ذات المؤشر له أهمية كبيرة لأن كل نوع له استخداماته تبعاً لنظرية عمله . كما أن الرموز الخاصة بدائرة الاستعمال المناسبة وكذلك الخاصة بوضع الجهاز أثناء الاستخدام موضحة بالجدولين ٨ - ٤ و ٨ - ٥ .

النوع	الرمز	نظام العمل	مثال	الدائرة المستخدمة	القراءة بالجهاز AC
ملف متحرك		(١) تستخدم القوة الكهرومغناطيسية بين المجال المغناطيسي لمغناطيس دائم والتيار المار في ملف	$VA\Omega\phi$	DC	—
مقوم التيار		(٢) مكونة من مقوم التيار مع جهاز قياس نوع ملف متحرك	VA	AC	قيمة متوسطة
نوع كهروحراري		(٣) مكونة من ازدواج حراري وجهاز قياس نوع ملف متحرك	VAW	AC/DC (DC)	قيمة فعالة
ملف متحرك		(٤) تستخدم القوة الكهرومغناطيسية لمغناطيس متحرك موضوع في مجال مغناطيسي	VA	AC/(DC)	قيمة فعالة
دينامومتر كهربائي		(٥) تستخدم القوة الكهرومغناطيسية بين التيارات المارة داخل الملفات	VAWf	AC/DC	قيمة فعالة
نوع حثي		(٦) تستخدم القوة الكهرومغناطيسية بين مجال مغناطيسي متغير والتيار متولد بالمجال المغناطيسي	VAWh	AC	قيمة فعالة
نوع كهروستاتيكي		(٧) استخدام القوة الكهروستاتيكية بين الاقطاب المشحونة	V	AC/DC	قيمة فعالة
نوع الريشة الرنانة		(٨) استخدام الرنين الميكانيكي للريش الرنانة	f	AC	—

V: فولت ميتر A: أميتر W: قياس القدرة Ω : جهاز قياس الأوم ϕ : فيض مغناطيسي f: جهاز قياس التردد W: جهاز قياس وات ساعة

الجدول ٨ - ٣ تقسيم اجهزة القياس ذات المؤشر على اساس نظام العمل

الرمز	الدائرة
—	DC
~	AC
≡	DC/AC
≡≡	جهد متغير ثلاثي الأوجه متوازن
≡≡≡	جهد متغير ثلاثي الأوجه غير متوازن

الجدول ٨ - ٤ رموز دائرة الاستعمال المناسبة

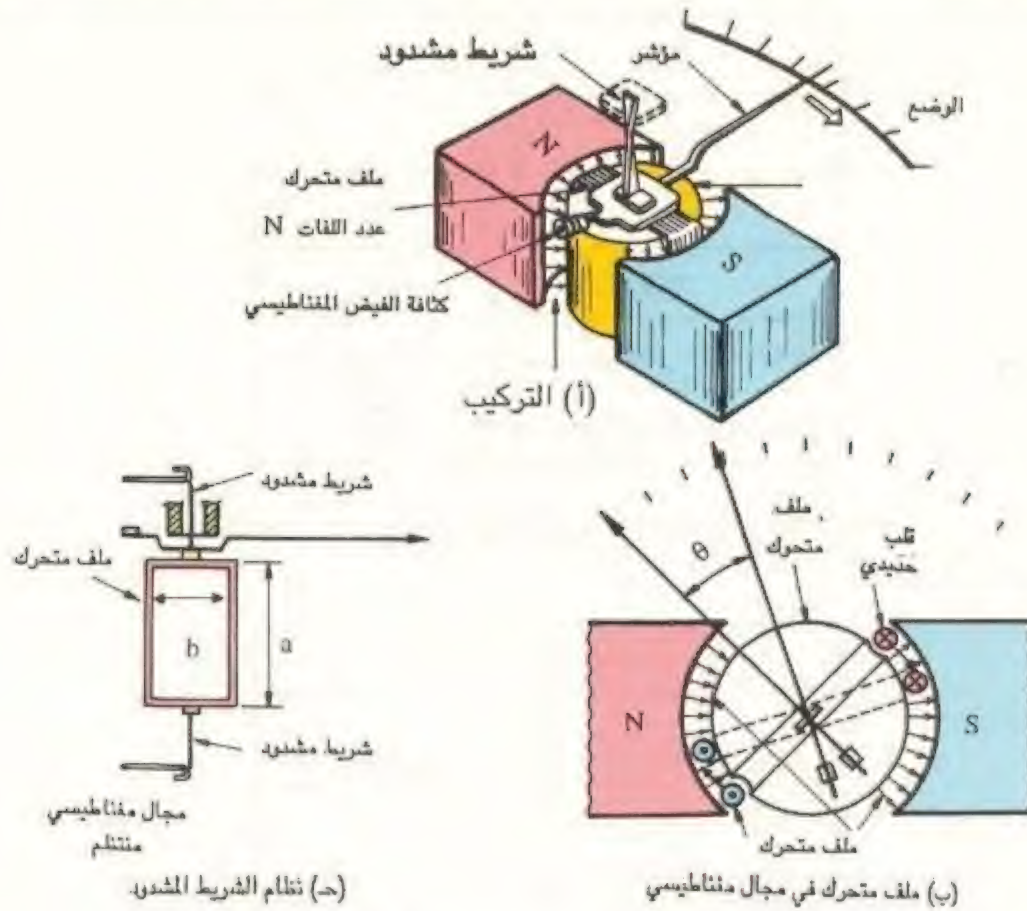
الرمز	الوضع
⊥	رأسي
⌊	أفقي
∠ ^{60°}	مائل 60°

الجدول ٨ - ٥ رموز وضع الجهاز عند الاستخدام

ب - أجهزة القياس ذات الملف المتحرك Moving - coil type

يبين شكل ٨ - ٧ تركيب جهاز القياس ذي الملف المتحرك الذي يستخدم على نطاق واسع في أجهزة القياس الكهربائية ذات المؤشر .

كما هو موضح في الشكل ٨ - ٧ (أ) ، فإن المجال المغناطيسي العمودي يتولد بواسطة مغناطيس دائم مثبت حول قلب حديدي أسطواني كما يوضع ملف حول إطار في الفجوة الهوائية . ويجذب هذا الملف بزنبرك سطحي يسمى الشريط المشدود من القمة إلى القاع كما هو مبين بالشكل ٨ - ٧ (ب) ويسمح له بدوران الملف .



الشكل ٨ - ٧ جهاز قياس نو ملف متحرك

عند قياس التيار I المار في الملف المتحرك ، وطبقاً لقاعدة اليد اليسرى لفلمنج فإن العزم T_d المتولد يؤدي إلى دوران الملف كما هو موضح بالشكل ٨ - ٧ (ب). بافتراض أن كثافة الفيض المغناطيسي للمغناطيس هي B (T) وعدد لفات الملف N ، والتيار المار I [A] وابعاد إطار الملف a [m] ، b [m] فإن العزم الناتج يعرف بالمعادلة الآتية :

$$T_d = B N a b I \quad [N.m] \quad (8-3)$$

ومن الناحية الأخرى نجد أن الزنبرك السطحي يولد قوة لاستعادة وضع الزنبرك إلى الوضع الأصلي ، ويسمى هذا بعزم التحكم T_C ويوصف بالمعادلة الآتية مع اعتبار زاوية دوران المؤشر θ .

$$T_c = k \theta [N \cdot m]$$

(8 - 4)

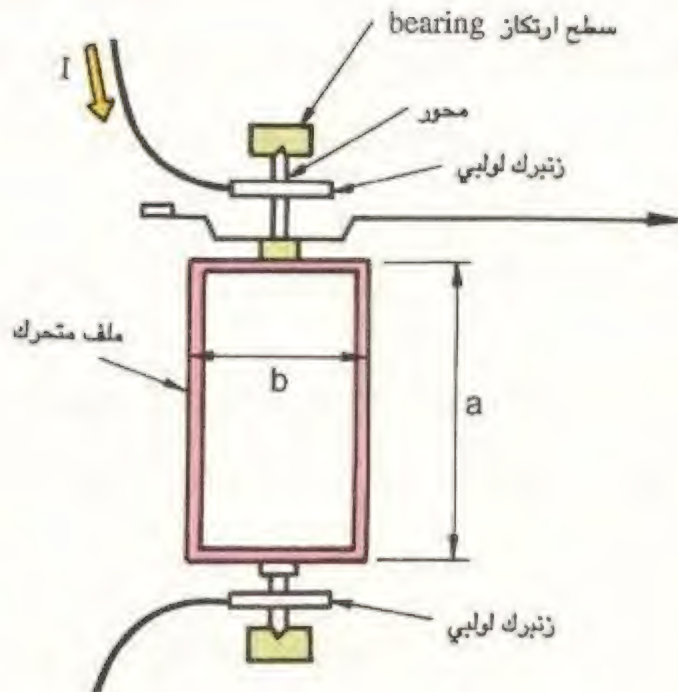
و k هنا هي ثابت يحدد طول وسمك المادة المكونة للزنبرك السطحي . إن معدل انحراف المؤشر يتوقف عند وضع الاتزان عندما يتساوى العزمان T_d , T_c ونتيجة لهذا فإن زاوية انحراف المؤشر يمكن الحصول عليها من المعادلة الآتية، والتي تبين تناسب زاوية الانحراف θ مع التيار المار بالملف :

$$\theta = \frac{B N a b}{k} I$$

(8 - 5)

وبالتالي فإن وحدة الدفع هي الجزء الذي يولد العزم اللازم لانحراف المؤشر طبقاً للكمية المقاسة . ووحدة التحكم هي الجزء الخاص بتوليد عزم التحكم ضد عزم الدفع ليعيد المؤشر إلى الوضع صفر .

وحدة التحكم تشمل الزنبرك اللولبي الموضح بالشكل ٨ - ٨ بالإضافة إلى النوع الشريطي المشدود .



الشكل ٨ - ٨ التحميل المحوري

في النوع الزنبركي اللولبي يثبت ملف الزنبرك اللولبي على محامل مركزية ، وهذا النوع يسمى نظام التحميل المحوري . ويوضح الشكل ٨ - ٧ (ج) نظام الشريط المشدود . وهذا النظام يستعمل عادة في حالة عدم وجود احتكاك وتاكل للمحمل وذلك للحفاظ على دقة القياس كما أنه يتحمل البخار والصدمات .

ويمثل الشريط المشدود والزنبرك اللولبي ممراً للتيار للمرور إلى الملف المتحرك . كما أنه يستغرق بعض الوقت لوقف تأرجح المؤشر خلال زمن اتزان عزم الدفع مع عزم التحكم. هذا الزمن يمكن أن يخفض بفرملة حركة المؤشر . ويسمى الجهاز المستخدم في ذلك بوحدة الإخماد. والملف المستخدم في أجهزة القياس ذات الملف المتحرك يلف على إطار من الألومنيوم الذي يتكون من لفة واحدة . وعندما يقطع الإطار خطوط القوى المغناطيسية للمغناطيس الدائم، يمر تيار كهربائي في إطار الألومنيوم طبقاً لقاعدة اليد اليمنى لفلمنج . والقوة الكهرومغناطيسية المتولدة بسبب مرور التيار وخطوط القوى المغناطيسية تعمل على منع حركة الملف كقوة فرملة . وهكذا فإن وحدة الدفع ووحدة التحكم ووحدة الإخماد تمثل ثلاثة عناصر رئيسية لأجهزة البيان الكهربائية، ويتميز جهاز قياس الملف المتحرك بالحساسية العالية والتدريج الدقيق ويستخدم بصفة خاصة في قياس التيار المستمر .

سؤال ١

إذا كانت كثافة الفيض المغناطيسي $B = 0.5 \text{ [T]}$ ، $a = 2 \text{ [C m]}$ ، $b = 2 \text{ [C m]}$ وعدد اللفات $N = 200$ لفة ، والتيار المار بالملف 5 [mA] ، احسب عزم الدفع .

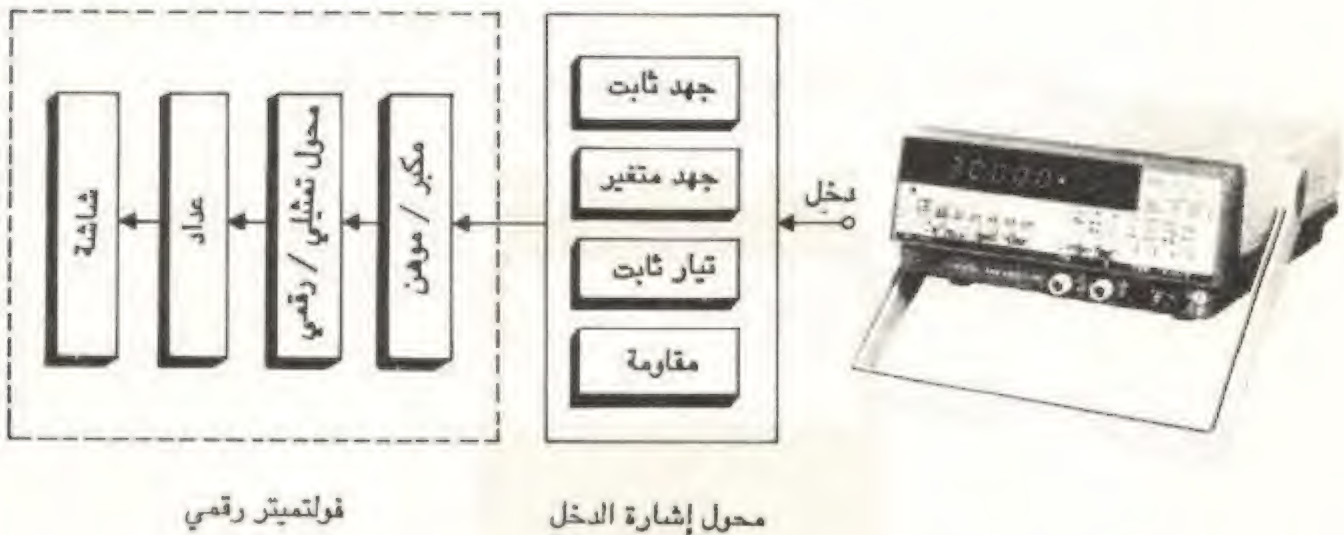
ح - جهاز القياس الرقمي Digital meter

جهاز القياس الرقمي هو جهاز قياس كهربائي يظهر الكميات المقاسة في صورة أرقام وقد كانت أغلب أجهزة القياس الكهربائية المستخدمة في السابق أجهزة تمثيلية . وقد بدأت أجهزة

القياس الرقمية في الانتشار بسرعة مع التقدم السريع في تصنيع أشباه الموصلات والهندسة الرقمية . وبالمقارنة مع أجهزة القياس التمثيلية، فإننا نلاحظ أن أجهزة القياس الرقمية تتميز بسهولة القراءة ويسر التسجيل وإرسال البيانات ومعالجتها .

وفي الوقت الحاضر تستخدم أجهزة القياس الرقمية لقياس الجهد و التيار والمقاومة والتردد . ويوضح الشكل ٨ - ٩ المظهر الخارجي والتركيب الأساسي لجهاز رقمي متعدد القياس . ويمكن استخدام هذا الجهاز لقياس الجهد والتيار غير المتردد والجهد المتردد والمقاومة .

في الشكل ٨ - ٩ (ب) نجد أن الكمية المقاسة تم توصيلها على أطراف الدخل حتى تحول إلى جهد ثابت وتكبر وتوهن كي تدخل محول الجهد التمثيلي / الرقمي . وبعد عملية التحويل التمثيلية / الرقمية ؛ يتم حساب عدد النبضات في دائرة العد وتظهر نتيجة القياس كأرقام مضاعفة بواسطة ثنائيات البعث .



ب - المخطط الصندوقي

أ - الشكل الظاهري

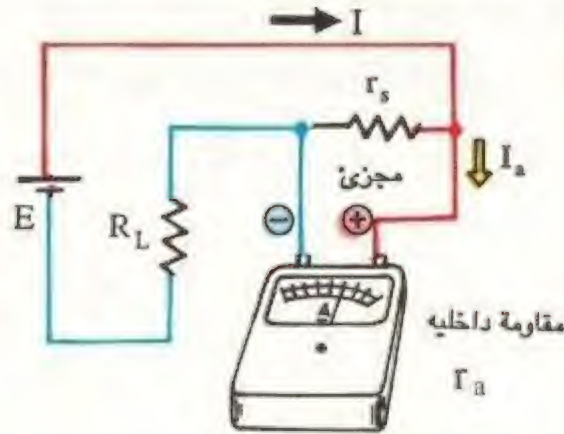
الشكل ٨ - ٩ جهاز رقمي متعدد القياس

٨ - ٣ أجهزة القياس ذات المؤشر Pointer type meters

٨ - ٣ - ١ جهاز قياس التيار المستمر DC meters

١ - جهاز قياس الأمبير DC ammeter

تتناسب زاوية انحراف الملف المتحرك مع شدة التيار المار في الملف، ويستخدم ذلك لقياس التيار المستمر . ولقياس تيار كبير، يتم توصيل مقاومة على التوازي مع جهاز قياس الأمبير كما هو مبين بالشكل ٨ - ١٠ ، وهو ما يسبب عدم سماح الملف المتحرك المصنوع من الأسلاك الرفيعة بمرور التيار الكبير .



الشكل ٨ - ١٠ توصيل مقاومة مجزئ التيار مع الأميتر



الشكل ٨ - ١١ أميتر متعدد التدرج

وتمثل مقاومة الملف المتحرك المقاومة الداخلية لجهاز الأميتر، ويرمز لها بالرمز $r_a (\Omega)$ المقاومة الموصلة على التوازي $r_s (\Omega)$ ويمكن حساب التيار I_a المار بجهاز الاميتر بالنسبة للتيار الكلي I للدائرة كما يلي :

$$I_a = \frac{r_s}{r_s + r_a} I \quad (8-6)$$

$$I = \frac{r_s + r_a}{r_s} I_a = \left(1 + \frac{r_a}{r_s}\right) I_a$$

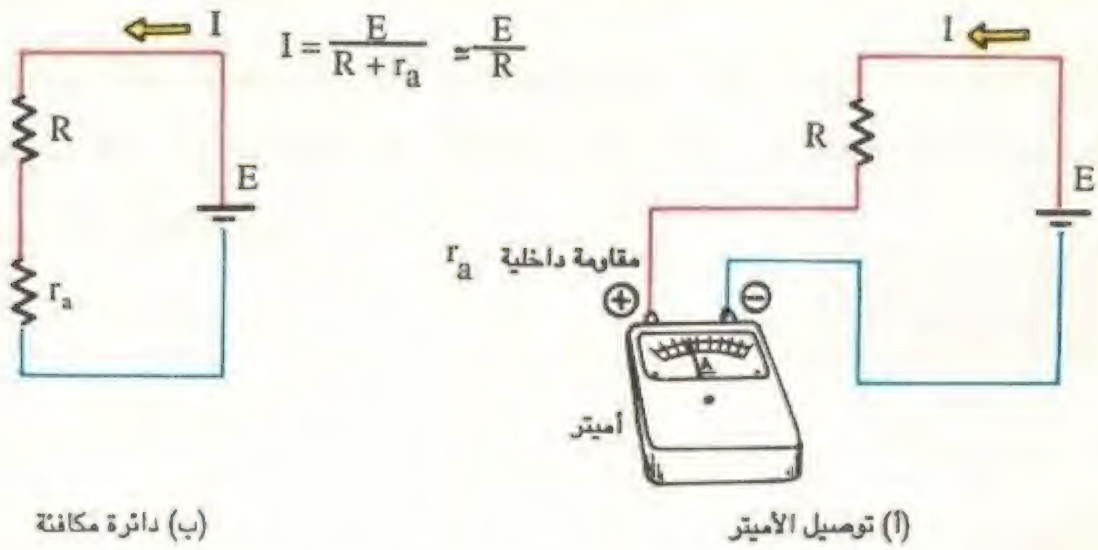
$$I = m I_a \quad (8-7)$$

وهكذا فإن المقاومة r_s تمكن من قياس تيار مقداره m مرة قدر التيار المسموح به داخل الملف المتحرك . وتسمى المقاومة r_s بمقاومة تجزئة التيار . ومعامل تكبير تجزئة التيار يوصف بالمعادلة الآتية :

$$m = 1 + \frac{r_a}{r_s}$$

وعموماً فإن مقاومة تجزئة التيار تكون بداخل جهاز الأميتر . وجهاز الأميتر ، الذي يشمل أكثر من مقاومتين لتجزئة التيار يسمى جهاز أميتر متعدد التدرج .

ويوصل جهاز الأميتر على التوالي مع الدائرة كما هو موضح بالشكل ٨ - ١٢ (أ) ودائرته المكافئة تمثل بالشكل ٨ - ١٢ (ب)، ومعادلة التيار $I [A]$ موضحة أيضاً بالشكل . فعندما تكون المقاومة r_a صغيرة نسبياً بالنسبة للمقاومة R فيمكن إهمال المقاومة r_a عملياً .



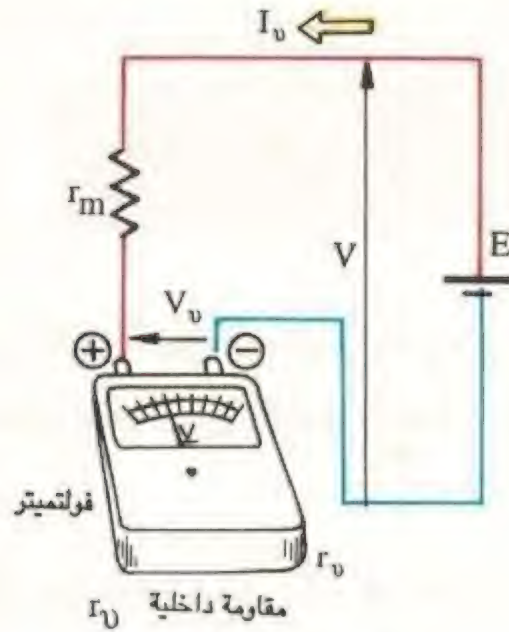
الشكل ٨ - ١٢ جهاز قياس التيار (الأميتر) ودائرة القياس

سؤال ٢

احسب مقاومة مجزئ التيار الموصلة بجهاز أميتر بحيث يكون أقصى تيار للملف 1mA والمقاومة الداخلية تكافئ $50\ \Omega$ حتى يتمكن جهاز الأميتر من قياس أقصى تيار 10mA .

ب - جهاز قياس الجهد المستمر DC voltmeter

يمكن استخدام جهاز الملف المتحرك في جهاز قياس الجهد المستمر . وكذلك يمكن استخدام الأميتر من نوع الملف المتحرك الذي له أقصى تدرج 1mA ومقاومة داخلية $50\ \Omega$ كجهاز قياس الجهد بأقصى تدرج 50mV . هذا التدرج لا يمكن استخدامه في قياس الجهد الكبير، لذا يتم ادخال مقاومة بجهاز القياس كما هو موضح بالشكل ٨ - ١٣ لاستعماله كفولتميتر .



الشكل ٨ - ١٣ مضاعف



الشكل ٨ - ١٤ جهاز فولتميتر متعدد التدرج

بافتراض أن مصدر جهد التغذية هو $V [V]$ والتيار المار إلى جهاز الفولتميتر $I_v [A]$ والمقاومة الداخلية $r_v [\Omega]$ والمقاومة الموصلة على التوالي $r_m [\Omega]$ والجهد المسلط على جهاز الفولتميتر $V_v [V]$ إذن يمكن استنتاج المعادلات الآتية :

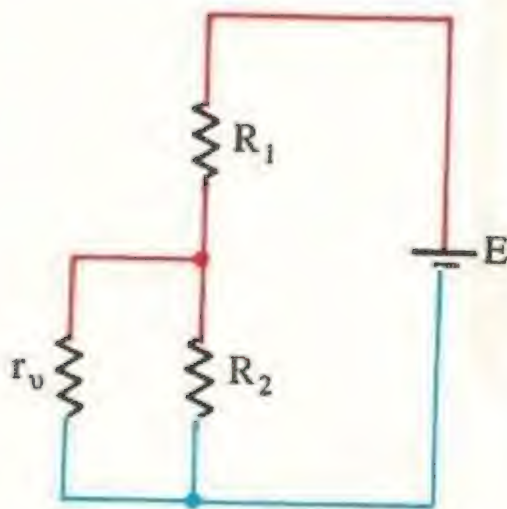
$$V_v = r_v I_v = \frac{r_v}{r_m + r_v} V \quad (8-8)$$

$$V = \frac{r_m + r_v}{r_v} V_v = \left(1 + \frac{r_m}{r_v}\right) V_v = n V_v \quad (8-9)$$

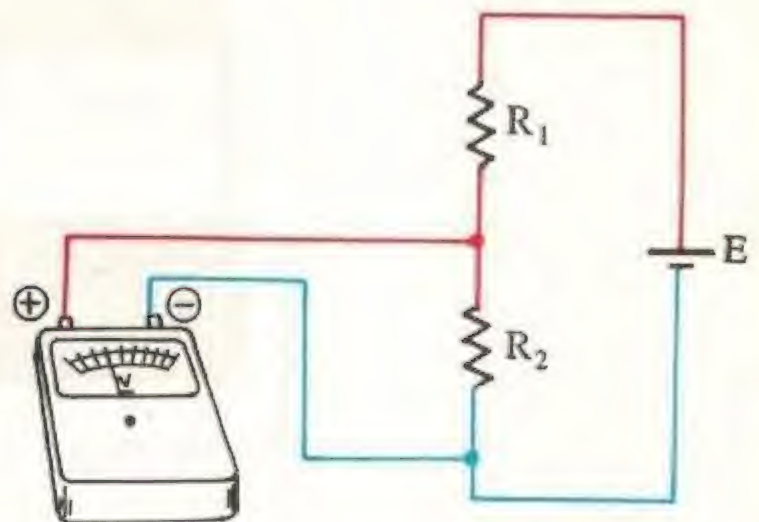
ومن هذه المعادلات نجد إن المقاومة r_m تسمح لقياس جهد مقداره n مرة قدر الجهد المسلط على جهاز القياس ؛ وهذه المقاومة r_m تسمى بالمضاعف ومضاعفتها تعرف بالمعادلة

$$n = 1 + \frac{r_m}{r_v}$$

ويوجد عادة المضاعف داخل جهاز الفولتميتر. وكما هو الحال بجهاز الأميتر فإن الفولتميتر متعدد التدرج له أكثر من مقاومتين للتضاعف .



(ب) دائرة مكافئة



(i) توصيل جهاز الفولتميتر لقياس الجهد الواقع على المقاومة R_2

الشكل ٨ - ١٥ فولتميتر ودائرة القياس الخاصة به

يجب أن يوصل جهاز الفولتميتر على التوازي مع الجزء المقاس . وتستخدم الدائرة بالشكل ٨ - ١٦ في تحليل تأثير المقاومة الداخلية .

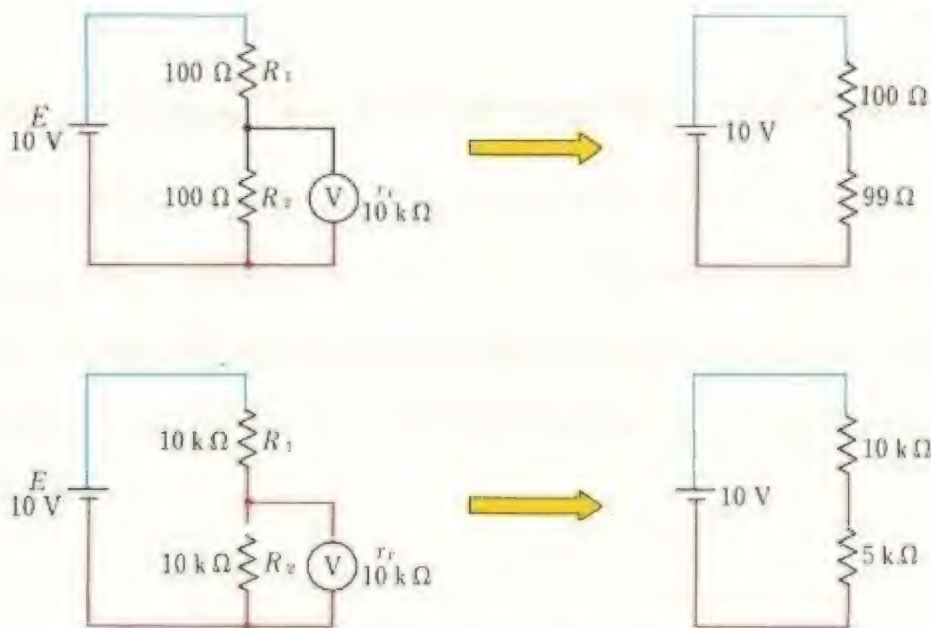
كما هو موضح بالشكل ٨ - ١٦ (أ) و (ب) سوف نقوم بحساب الجهد المبين بجهاز قياس الفولتميتر المزود بالمقاومة الداخلية $10 \text{ k}\Omega$. وكما في الشكل ٨ - ١٦ (أ) توصل مقاومة قيمتها حوالي 99Ω وهى تمثل محصلة المقاومتين R_2 , r_v على التوازي . وفى هذه الحالة فإن الجهد $V_a [\text{V}]$ الواقع على الفولتميتر يمكن حسابه بالمعادلة الآتية .

$$V_a = \frac{99}{100 + 99} \times 10 = 4.97 \text{ V}$$

وفي الشكل ٨ - ١٦ (ب) نجد أن المقاومة المحصلة من توصيل المقاومة r_v , R_2 تكافئ $5 \text{ k}\Omega$ وفى هذه الحالة فإن الجهد $V_b [\text{V}]$ الواقع على الفولتميتر يتم حسابه بالمعادلة الآتية :

$$V_b = \frac{5000}{10000 + 5000} \times 10 = 3.3 \text{ V}$$

وفي الدوائر الموضحة بالأشكال ٨ - ١٦ (أ) و (ب) يكون الجهد المسلط على المقاومة R_2 بدون توصيل الفولتميتر هو 5 V . ولهذا فإن صغر المقاومة الداخلية للفولتميتر بالمقارنة بمقاومة دوائر القياس كما بالشكل ٨ - ١٦ (ب) يجعل الخطأ كبيراً في القياس مما يتطلب حرص القائمين بالقياس .



الشكل ٨ - ١٦ تأثير المقاومة الداخلية للفولتميتر .

سؤال ٣

استعرض المقاومة الداخلية للفولتميترات المختلفة و اجهزة اختبار الدوائر والفولتميترات الإلكترونية .

سؤال ٤

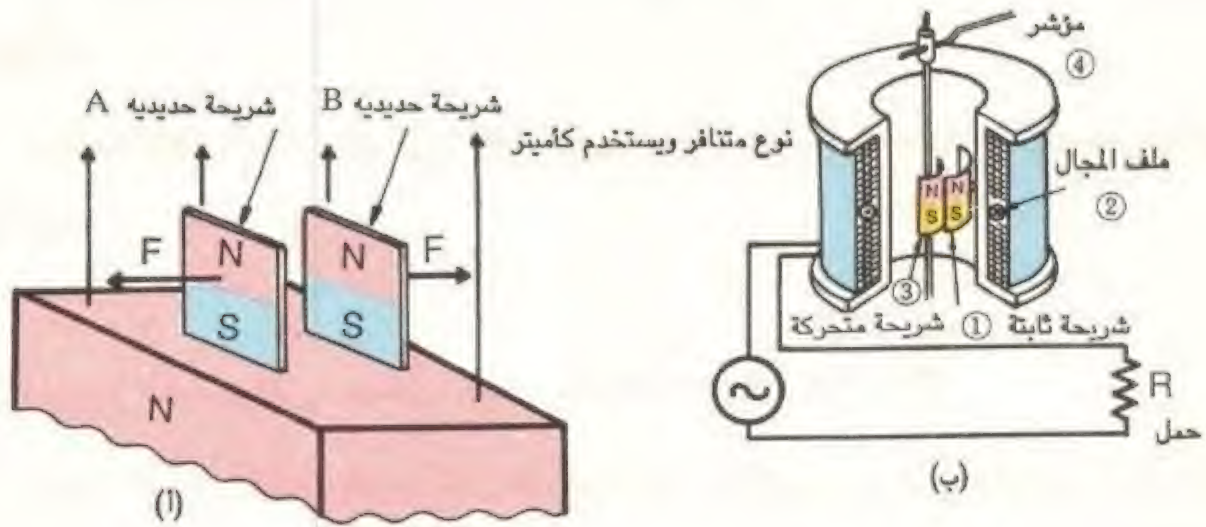
احسب مقادير المضاعف لتحويل فولتميتر بأقصى تدرج $10[V]$ ومقاومة داخلية $10\ k[\Omega]$ إلى فولتميتر بأقصى تدرج $100[V]$.

٨ - ٣ - ٢ جهاز قياس التيار المتغير (المتردد) AC meters

أجهزة قياس التيار المتردد المستخدمة بكثرة في الأغراض التجارية مثل الأميتر والفولتميتر تستعين بنوعين من المغناطيس النوع الأول هو المغناطيس المتحرك والثاني هو المغناطيس المقوم.

أ - اجهزة قياس المغناطيس المتحرك Moving - iron type meter

كما هو موضح بالشكل ٨ - ١٧ (أ) ، توجد شريحتان A , B من الحديد موضوعتان في مجال مغناطيسي قوي، وتكتسب الشريحة الحديدية الخاصية المغناطيسية كما بالشكل، وتتولد قوة تنافر مغناطيسية على كل شريحة ، وتعتمد أجهزة القياس ذات المغناطيس المتحرك على هذه الظاهرة . ويبين الشكل ٨ - ١٧ (ب) التركيب الأساسي لأجهزة القياس ذات المغناطيس المتحرك .



الشكل ٨ - ١٧ جهاز القياس من نوع المغناطيس المتحرك

كما هو موضح بالشكل ٨ - ١٧ (ب) عندما توضع شريحة المغناطيس المتحرك (3) وجهاً لوجه مع شريحة المغناطيس الثابت (1) لكي تسمح بحرية الحركة ويمر التيار خلال الملف (2) حول الشرائح المغناطيسية، تكتسب الشرائح المغناطيسية الخاصية المغناطيسية وتتولد قوة تنافر بين المغناطيسين. أما إذا عكس مرور التيار بالملف فإنه يعكس اتجاه الخطوط المغناطيسية في الشريحتين المغناطيسيتين وتتولد قوة تنافر بينها أيضاً، ومن ثم عندما يمر تيار خلال الملف تتولد قوة تنافر بين الشريحتين المغناطيسيتين بغض النظر عن اتجاه التيار. ويتحرك المؤشر (4) المثبت بشريحة المغناطيس المتحرك ويتوقف دوران المؤشر عندما تتزن قوة التنافر مع العزم الناتج من مرونة الزنبرك اللولبي. ويكون العزم المتولد بين الشرائح المغناطيسية متناسباً مع مربع شدة التيار المار بالملف والذي يعوق تدرج القياس. إلا أن التدرج يتم عملياً بتحسين شكل الشرائح المغناطيسية.

وبما أن جهاز قياس المغناطيس المتحرك لا يحتاج تياراً إلى الأجزاء المتحركة فإن هذه الأجهزة تستخدم في قياس الكميات الكبيرة من التيار والجهد مثل الأميترات ذات أقصى تدرج من 20mA إلى 100A والفولتميترات ذات أقصى تدرج من 15V إلى 600V.

سؤال ٥

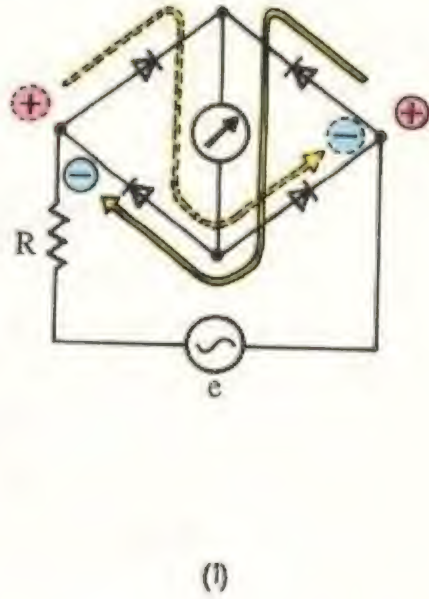
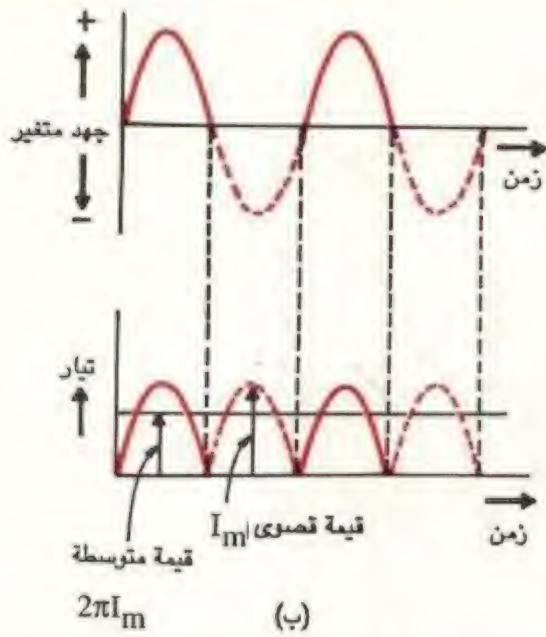
يتطلب جهاز قياس من نوع المغناطيس المتحرك تغليفاً ضد المغناطيسية . وضح السبب

ب - جهاز القياس المزود بمقوم التيار Rectifier type meter

إن جهاز القياس المزود بمقوم التيار هو جهاز قياس كهربائي يستخدم لقياس التيار المتردد والجهد المتردد، وذلك عن طريق الجمع بين جهاز مقوم التيار وجهاز قياس الملف المتحرك .
وتستخدم الثنائيات التي يمكن أن تقوم بعملية التقويم وجهاز قياس الملف المتحرك كما هو موضح بالشكل ٨ - ١٨ (أ) . وبغض النظر عن اتجاه الجهد فإن التيار المبين بالخطوط المتصلة والمتقطعة يمر خلال جهاز القياس في الاتجاه نفسه كما هو مبين بالشكل ٨ - ١٨ (ب) .
ويحصل الملف المتحرك على عزم يتناسب مع القيمة المتوسطة للتيار وينحرف المؤشر طبقاً لتلك القيمة المتوسطة . إلا أن القيمة الفعالة للتيار المتردد يمكن قياسها بجعل تدريج جهاز القياس المقوم يتحول ليظهر القيمة الفعالة ؛ ولهذا عند قياس موجة الجهد غير الجيبية يحدث خطأ لأن نسبة القيمة المتوسطة والقيمة الفعالة تتغير .

سؤال ٦

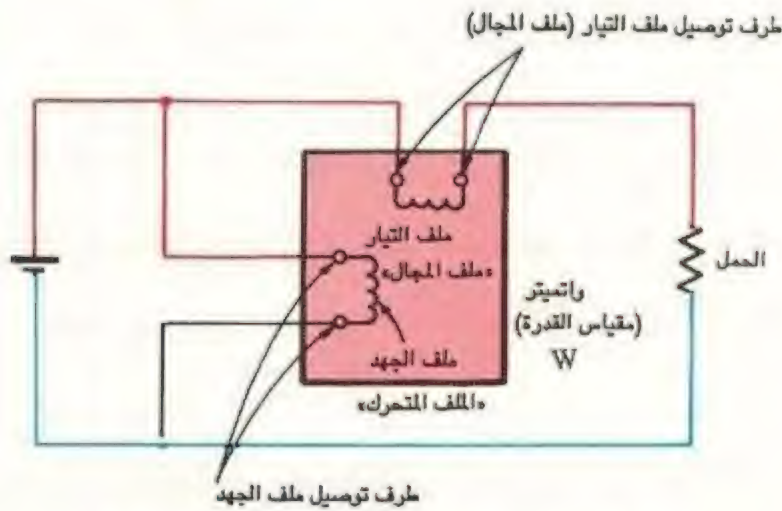
احسب القيمة القصوى والفعالة لموجة جهد جيبية قيمتها المتوسطة 100V .



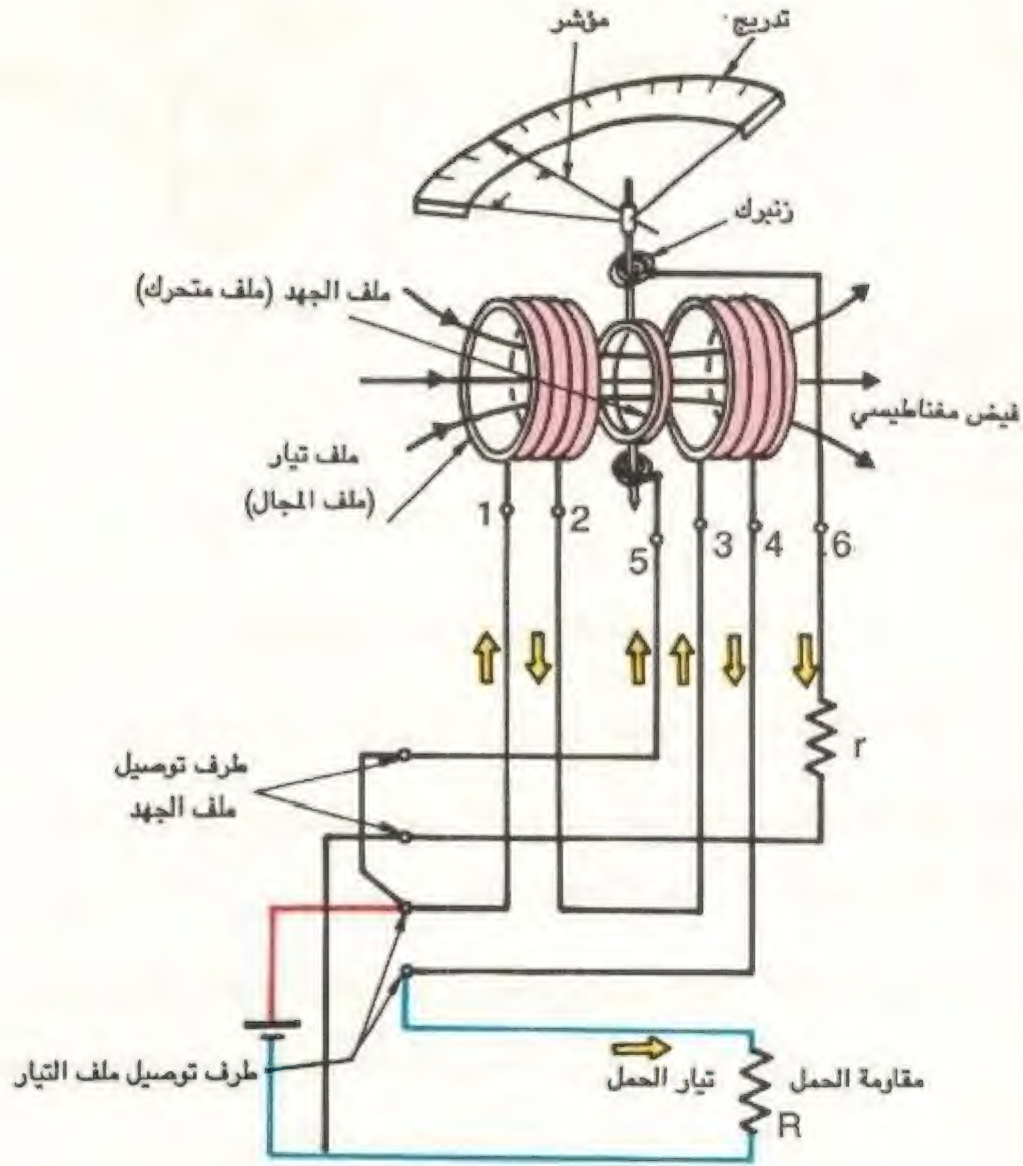
الشكل ٨ - ١٨ جهاز قياس بمقوم للتيار

٨ - ٤ أجهزة قياس القدرة (وات ميتر) Wattmeters

جهاز القياس الكهروديناميكي يعدّ النوع الشائع لقياس القدرة الكهربائية ، وكما هو موضح بالشكل ٨ - ١٩ ، يتكون جهاز قياس القدرة من ملف الجهد وملف التيار متصلين . هذا التوصيل لملف الجهد وملف التيار يسمح لفرق الجهد الواقع على الحمل بأن يسلط على ملف الجهد ، وكذلك بمرور تيار الحمل في ملف التيار .



الشكل ٨ - ١٩ قياس القدرة الكهربائية

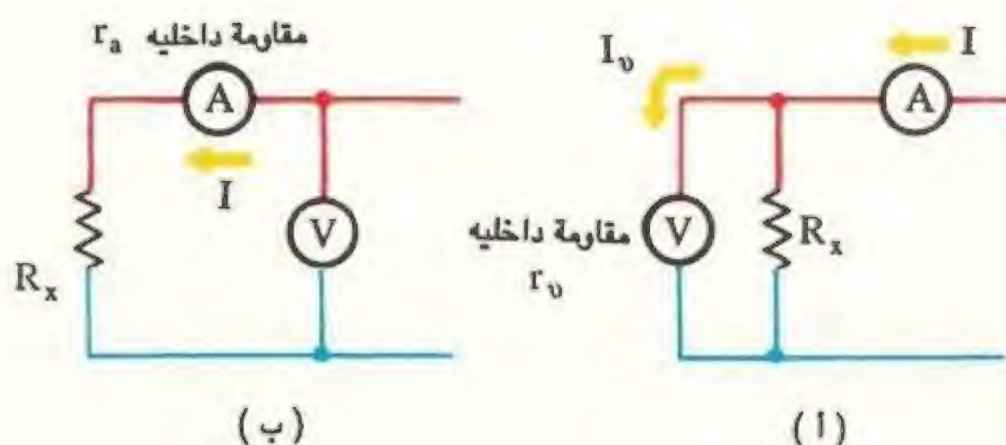


الشكل ٨ - ٢٠ المكونات الداخلية لجهاز قياس القدرة

وتقاس القدرة بقراءة قيمة انحراف المؤشر . ويوضح الشكل ٨ - ٢٠ مخطط عمل لدائرة جهاز قياس القدرة ، حيث يمر تيار الحمل خلال ملف التيار ، والتيار المار يتناسب مع فرق الجهد لمصدر القدرة .

كما يتم توصيل الزنبرك والمؤشر بملف الجهد ليسمح بالدوران طبقاً للعزم المتولد ، وزاوية الدوران θ للمؤشر تتناسب مع العزم المتولد .

تحسب المقاومة بالمعادلة $R_x = \frac{V}{I} [\Omega]$ على أساس قياس فرق الجهد $V [V]$ الواقع على المقاومة المجهولة R_x والتيار المار بالمقاومة $I[A]$. وتسمى هذه الطريقة طريقة الفولتميتر أو طريقة هبوط الجهد .



الشكل ٨ - ٢٢ طريقة استخدام الفولتميتر والأميتر في قياس المقاومة

ونتيجة لهذا توجد طريقتان لتوصيل جهازى الفولتميتر والأميتر كما هو موضح بالشكل ٨ - ٢٢ (أ) و (ب) وبافتراض أن القيمة المبينة بالفولتميتر هي $V(V)$ وتلك المبينة بالأميتر هي $I(A)$ ففي الشكل ٨ - ٢٢ (أ) .

$$R_x = \frac{V}{I - I_v} = \frac{V}{I - \frac{V}{r_v}}$$

وفى الشكل ٨ - ٢٢ (ب)

$$R_x = \frac{V - r_a I}{I} = \frac{V}{I} - r_a$$

ولذلك فإن الطريقة المذكورة بالشكل ٨ - ٢٢ (أ) تستخدم عندما تكون المقاومة R_x صغيرة نسبياً بالمقارنة بالمقاومة الداخلية r_v لجهاز الفولتميتر والطريقة المذكورة بالشكل ٨ - ٢٢ (ب) تستخدم في قياس المقاومة الأكبر نسبياً من المقاومة الداخلية r_a لجهاز الأميتر. حينئذ فإن المقاومة يتم حسابها بالمعادلة التالية :

$$R_x = \frac{V}{I} [\Omega]$$

أيضاً تقاس المقاومة باستخدام قناطر، وتكون القياسات بهذه الطريقة دقيقة بالرغم من عدم سهولة تنفيذها. وقد سبق شرح الطريقة التي تستخدم قنطرة هويتستون في الفصل الأول. ويستخدم جهاز الأوموميتر لقياس المقاومة بسهولة بالرغم من محدودية مدى القياس الذي يمكن أن يقوم به وهو جهاز سهل الاستخدام ويطبق قانون أوم لقياس المقاومة.

أ - تفاصيل أخرى

قد يحدث احتراق أو صدمة كهربائية بأجهزة القياس نتيجة وجود قصر بالدائرة أو نتيجة تأريض في حالة عدم كفاية العزل لدائرة الأجهزة الكهربائية. ولمنع حدوث هذه الحوادث يستخدم جهاز اختبار مقاومة العزل لقياس مقاومة العزل للأسلاك والأجزاء المختلفة لأجهزة القياس المستخدمة.



الشكل ٨ - ٢٣ جهاز اختبار مقاومة العزل .

وتقاس مقاومة العزل في الجهاز بتسليط جهد مثل 100V , 500V , 1000V (متولد في داخل جهاز الاختبار نفسه) لقياس الأشياء وتظهر القيمة المقاسة بانحراف إما المؤشر أو على شكل أرقام .

ويتولد فرق الجهد أما بواسطة مولد (ميجر) أو يزود بواسطة بطارية ، وفي الوقت الحاضر تستخدم البطارية بكثرة في هذا الغرض .

٨ - ٥ - ٢ قياس الحث والسعة الكهروستاتيكية

Measurement of inductance and electrostatic capacitance

إن قياس الحث والسعة الكهروستاتيكية لدائرة تيار متغير يتم بقياس التيار المتدفق وفرق الجهد المسلط عند تردد معين . تستخدم أجهزة القراءة المباشرة أيضاً في هذا القياس إلا أن القياس الدقيق يتم باستخدام قنطرة التيار المتغير .

وعلى عكس قياس المقاومة باستخدام قنطرة الاتزان ذات التيار الثابت ، فإن قياس الحث والسعة الكهروستاتيكية يتطلب قنطرة اتزان الممانعة مع مصدر قدرة متغيرة .

ويوضح الشكل ٨ - ٢٤ (أ) مخطط الفكرة لقنطرة الممانعة. حيث يتكون من الممانعات $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_3, \dot{Z}_4$ ، بالإضافة إلى مصدر قدرة متغيرة بتردد 1kHz وكاشف D . عندما يبين مؤشر الكاشف صفراً عن طريق ضبط ممانعة كل جانب من القنطرة ، يحدث اتزان القنطرة وتتحقق العلاقة الآتية :

$$\dot{Z}_1 \dot{Z}_4 = \dot{Z}_2 \dot{Z}_3$$

مثال لذلك لو أن الممانعة المجهولة هي \dot{Z}_1 فيمكن حسابها كالاتي :

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 \dot{Z}_3 / \dot{Z}_4$$

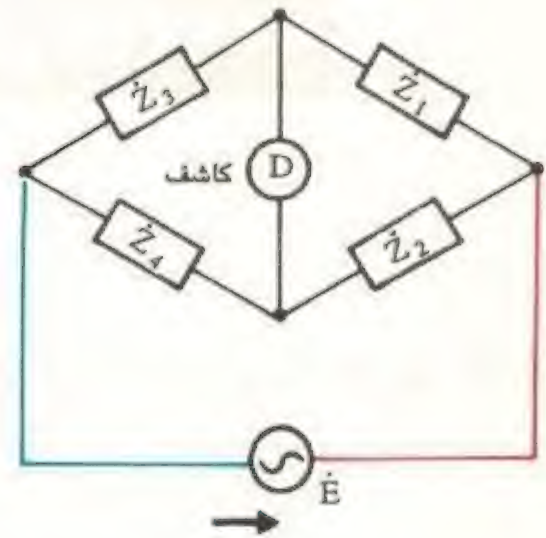
وفي جهاز قنطرة الاتزان الفعلية، والمسماة بقنطرة الممانعة أو القنطرة الدولية، تستخدم

عناصر قياسية من المقاومة R والملف L والمكثف C وتركب داخل القنطرة، ويتم عمل دوائر مختلفة لدائرة القنطرة باستخدام مفتاح متغير لمعرفة قيمة المقاومة المجهولة أو الملف أو السعة الكهروستاتيكية .

ويبين الشكل ٨ - ٢٤ (ب) الشكل الخارجي لقنطرة الاتزان .



ب - الشكل الخارجي .



أ - الفكرة

الشكل ٨ - ٢٤ قنطرة اتزان تيار متردد

٨ - ٦ قياس التردد Frequency measurement

جهاز قياس التردد يستخدم لقياس التردد للتيار المتردد . وتشمل أجهزة قياس التردد أنواع الريشة الرنانة ، والمقياس النسبي؛ وعداد التردد المصنوع بالتقنية الرقمية ، وفي الوقت الحاضر يستخدم عداد التردد على نطاق واسع .

٨ - ٦ - ١ جهاز قياس التردد ذو الريشة الهزازة (الرنانة) Vibrating reed



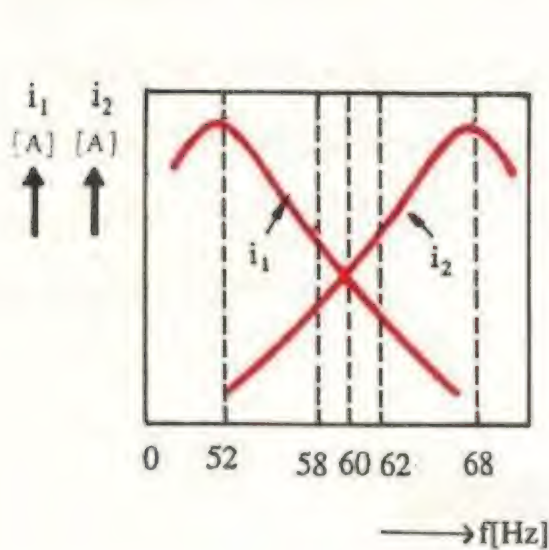
أ - الشكل الخارجى ب - تهتز الريشة عندما يسלט مصدر جهد متغير نو 50 هرتز

الشكل ٨ - ٢٥ جهاز قياس التردد ذو الريشة الهزازة

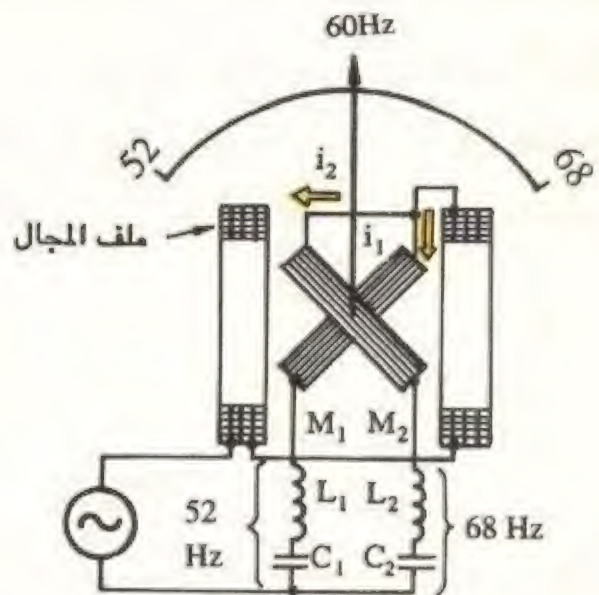
في جهاز قياس التردد ذى الريشة الرنانه، توضع الريش المهتزة التى لها تردد طبيعى بالقرب من مغناطيس كهربائي، ويوصل تيار متردد للمغناطيس من أجل اهتزاز الريش . ثم يقاس التردد بالريشة الهزازة التي تعطي أقصى ذبذبة بسبب الرنين، ويبين الشكل ٨ - ٢٥ الشكل الظاهري للجهاز وكذلك الريش الرنانه .

٨ - ٦ - ٢ جهاز قياس التردد المقسوم Quotient - meter type

كما هو موضح بالشكل ٨ - ٢٦ (أ) فإن المقياس النسبى يتركب عموماً من ملفين متحركين متعامدين M_1 ، M_2 لهما مؤشران موضوعان في ملفين ثابتين ، وينحرف المؤشر طبقاً لنسبة التيار i_1 ، i_2 المارين في الملفين M_1 ، M_2 .



(ب)



(i)

الشكل ٨ - ٢٦ جهاز قياس التردد من النوع النسبي

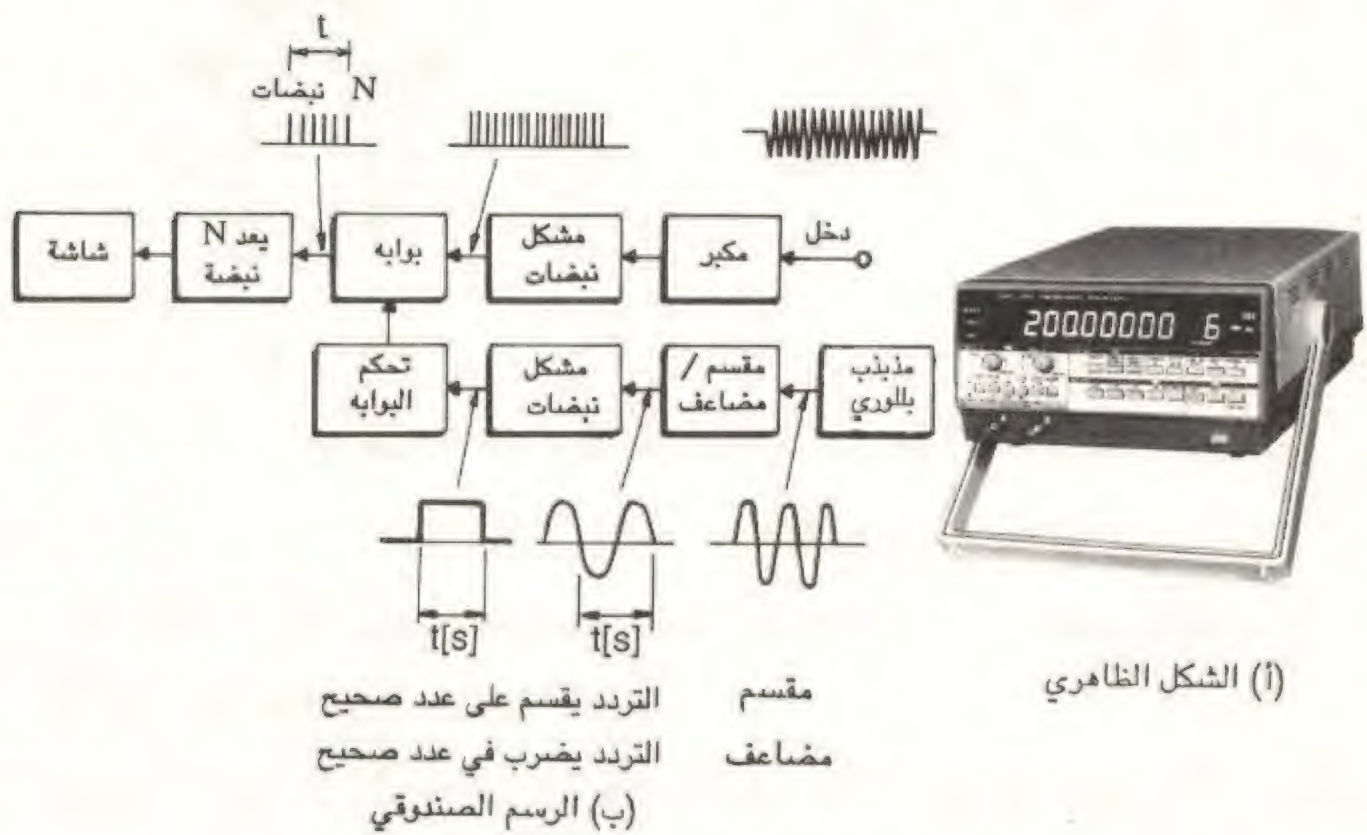
هذه النظرية تستخدم في جهاز قياس التردد من النوع النسبي ، ويتغير التياران i_1 ، i_2 طبقاً للتردد بواسطة الرنين .

ويعطي الشكل ٨ - ٢٦ (ب) مثلاً لتيار i_1 تردده 52Hz وتيار i_2 بتردد 68 Hz ويكون قياس التردد ممكناً بين 52 - 68 Hz .

٨ - ٦ - ٣ عداد التردد Frequency counter

عداد التردد هو جهاز قياس رقمي قادر على قياس المدة الزمنية بالإضافة إلى التردد : ويوضح الشكل ٨ - ٢٧ (i) الشكل الخارجي للجهاز ، بينما يبين الشكل ٨ - ٢٧ (ب) الهيكل الأساسي له .

وفي الشكل ٨ - ٢٧ (ب) ، توصل الموجة المراد قياس ترددها إلى أطراف الدخل، والتي يتم تحويلها إلى نبضات في دائرة تشكيل الموجة النبضي، ويوصل الخرج لدائرة البوابة . وتسمح دائرة البوابة للنبضات المتولدة من مذبذب بلوري أو مولد ذبذبات بالمرور خلال زمن معين . أما عدد النبضات المارة بالبوابة خلال المدة الزمنية المحددة فيحسب في دائرة الحساب وتعتبر عن تردد الموجة الداخلة .



الشكل ٨ - ٢٧ جهاز قياس التردد باستخدام عداد رقمي

وكمثال لذلك لو أن N نبضة مرت خلال البوابة في زمن $t [s]$ فيكون التردد f_x للموجة الداخلة كالآتي :

$$f_x = \frac{N}{t} [Hz]$$

سؤال ٧

احسب التردد وكذلك المدة الزمنية اللازمة لو أن 18 نبضة تم عدها خلال 1ms بواسطة جهاز قياس التردد .

٨ - ٧ الأقوميتير Avo-meter

الأقوميتير الذى يسمى أيضاً جهاز اختبار الدائرة، يسمح بقياس الجهد والتيار والمقاومة بسهولة باستخدام مفتاح تحويل .

ويشمل الأقوميتير جهاز اختبار تمثيلي لبيان الكمية المقاسة باستخدام مؤشر، أو جهاز اختبار رقمي ليظهر الكمية المقاسة بالأرقام .

يوضح الشكل ٨ - ٢٨ الشكل الخارجى لأقوميتير تمثيلي وآخر رقمي .



جهاز تمثيلي



جهاز رقمي

الشكل ٨ - ٢٨ جهاز أقوميتير تمثيلي (الجانب الأيسر) وآخر رقمي (الجانب الأيمن)

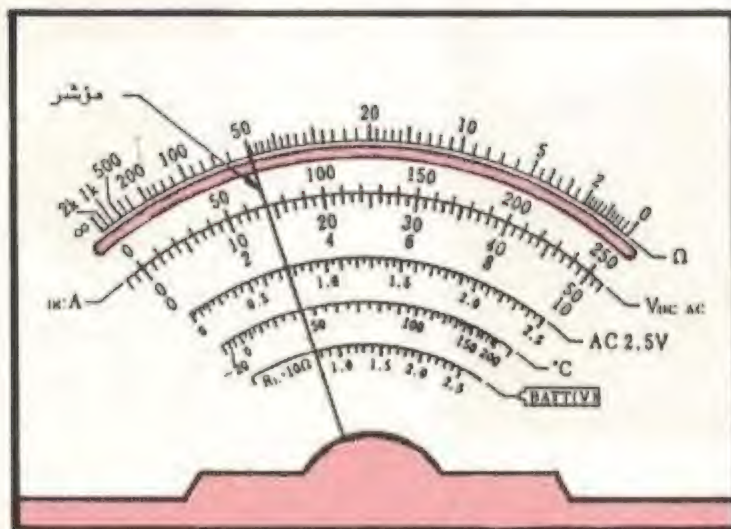
وتوجد أربعة متغيرات أساسية يمكن قياسها باستخدام الأقوميتير، وهى الجهد الثابت (DCV) والتيار الثابت (DCmA) والجهد المتغير (ACV) والمقاومة (Ω). بالإضافة لهذه الكميات الأربع يمكن قياس التيار المتغير والسعة الكهروستاتيكية للمكثف وكذلك درجة الحرارة.

ويمكن تجهيز الكمية المقاسة والمدى بواسطة مفتاح تحويل ، وهذه العملية تسمى ضبط المدى . مثال لذلك عندما يكون مفتاح التحويل على وضع DC 250 يمكن قياس الجهد الثابت لأقل من 250V .

٨ - ٧ - ١ جهاز الاختبار التمثيلي Analogue tester

يظهر جهاز الاختبار التمثيلي الكمية المقاسة بانحراف مؤشر جهاز الملف المتحرك على التدرج . ويتطابق تركيبه مع جهازى الأميتر والفولتميتر من نوع الملف المتحرك .

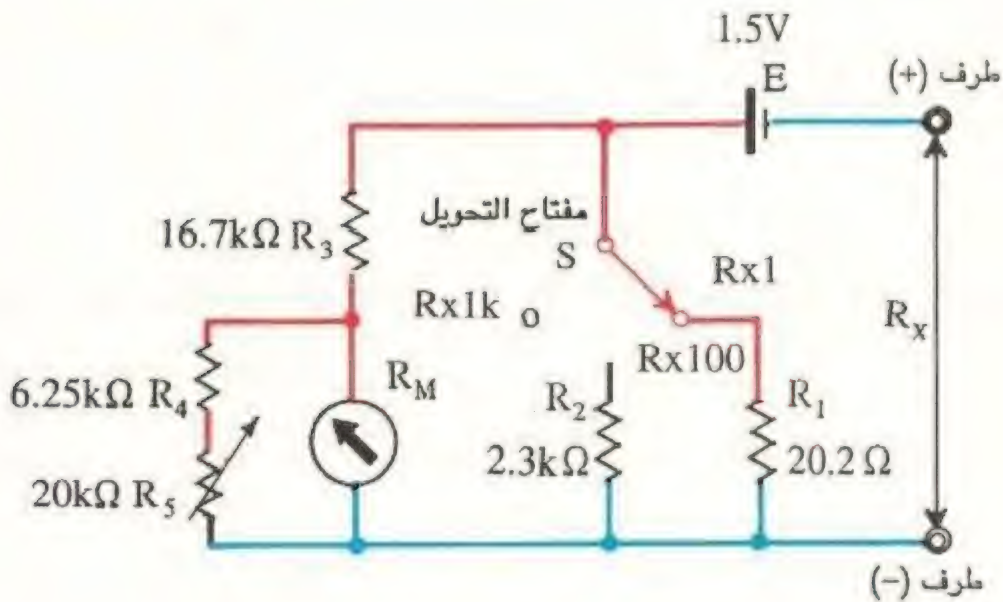
وتتدرج لوحة القراءة للكميات المقاسة كما هو موضح بالشكل ٨ - ٢٩. وتقرأ الكمية المقاسة مباشرة من انحراف المؤشر على التدرج طبقا لضبط المدى بواسطة مفتاح التحويل .



الشكل ٨ - ٢٩ مثال لتدرج جهاز الاختبار

ولقياس الجهد والتيار ، يتم تغيير المدى إلى الجهد أو التيار، ثم تتبع خطوات القياس المألوفة نفسها وقد لايشمل التدرج كل قيم المدى، ومثال لذلك فإن القراءة للمدى DC 500V يمكن قياسها على التدرج DC 50V ويكون معامل الضرب عشرة مرات ليعطى القيمة المقاسة، وتقاس المقاومة بوضع مفتاح التحويل على وضع مدى المقاومة . ويوضح الشكل ٨ - ٣٠ مثلاً للدائرة الداخلية لجهاز الاختبار .

ويوصل الجهد السالب إلى الطرف (+) والجهد الموجب إلى الطرف (-) . وهذه الحقيقة يجب مراعاتها عندما يجري تحديد القطبية للثنائيات .



الشكل ٨ - ٣٠ دائرة جهاز قياس المقاومة

عند قياس المقاومة يجب ضبط الوضع صفر للمؤشر، وذلك بعمل دائرة قصر على نهايتي التوصيل، ثم يتبع ذلك عملية القياس . ومدى قياس المقاومة يتكون من $x1k$, $x100$, $x1$. عندما يكون المدى على الوضع $x1$ ، يبين التدرج قيمة المقاومة، ويتطلب المدى $x1k$, $x100$ ضرب القراءة في 100 , 1000 على الترتيب .

٨ - ٧ - ٢ جهاز الاختبار الرقمي Digital tester

يوضح جهاز الاختبار الرقمي الكمية المقاسة في صورة أرقام . وفي الدائرة الداخلية لجهاز الاختبار الرقمي ، يتم تحويل الجهد ، والتيار والمقاومة إلى جهود ثابتة للقياس بواسطة الفولتميتر الرقمي مثلما يحدث في جهاز متعدد القياس الرقمي .

سؤال ٨

نفرض أن بيان المؤشر في الشكل ٨ - ٢٩ هو لقياس جهد ثابت على المدى DC 2.5 .
احسب قيمة الجهد المقاس .

سؤال ٩

بفرض أن بيان المؤشر في الشكل ٨ - ٢٩ لقياس المقاومة على المدى $\times 100$ ،
احسب قيمة المقاومة المقاسة .

٨ - ٨ راسم الذبذبات CRT oscilloscope

يوضح الشكل ٨ - ٣١ الشكل الظاهري لراسم ذبذبات ذي أنبوبة أشعة المهبط (CRT) لإظهار شكل الموجات للإشارات الكهربائية ، ويستخدم هذا الجهاز على نطاق كبير لقياس خواص وإصلاح وضبط الأجهزة الإلكترونية.

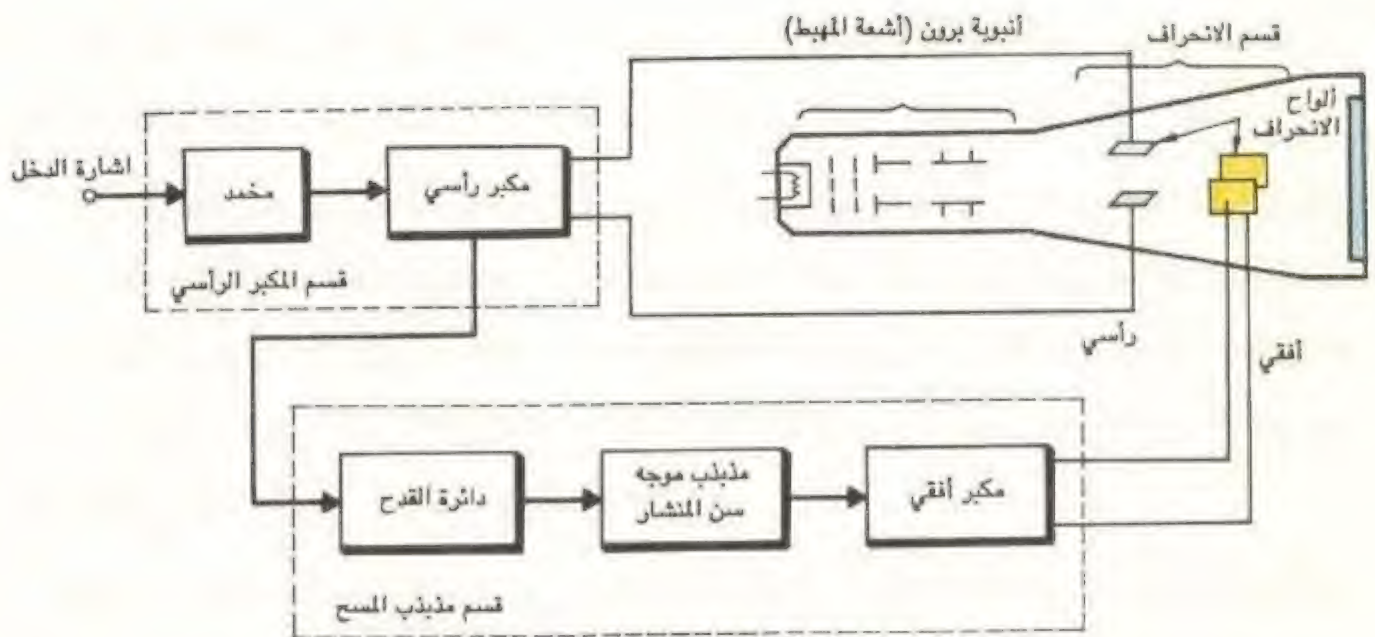


الشكل ٨ - ٣١ راسم ذبذبات CRT

٨ - ٨ - ١ التركيب وفكرة العمل

١- التركيب

يظهر الشكل ٨ - ٣٢ التركيب الأساسي لراسم ذبذبات ذي أنبوبة أشعة المهبط الذي يستخدم بكثرة في الوقت الحاضر .



الشكل ٨ - ٣٢ التركيب الأساسي لراسم ذبذبات أنبوبة أشعة المهبط (برون)

ب - أنبوبة أشعة المهبط (أنبوبة برون) Braun tube

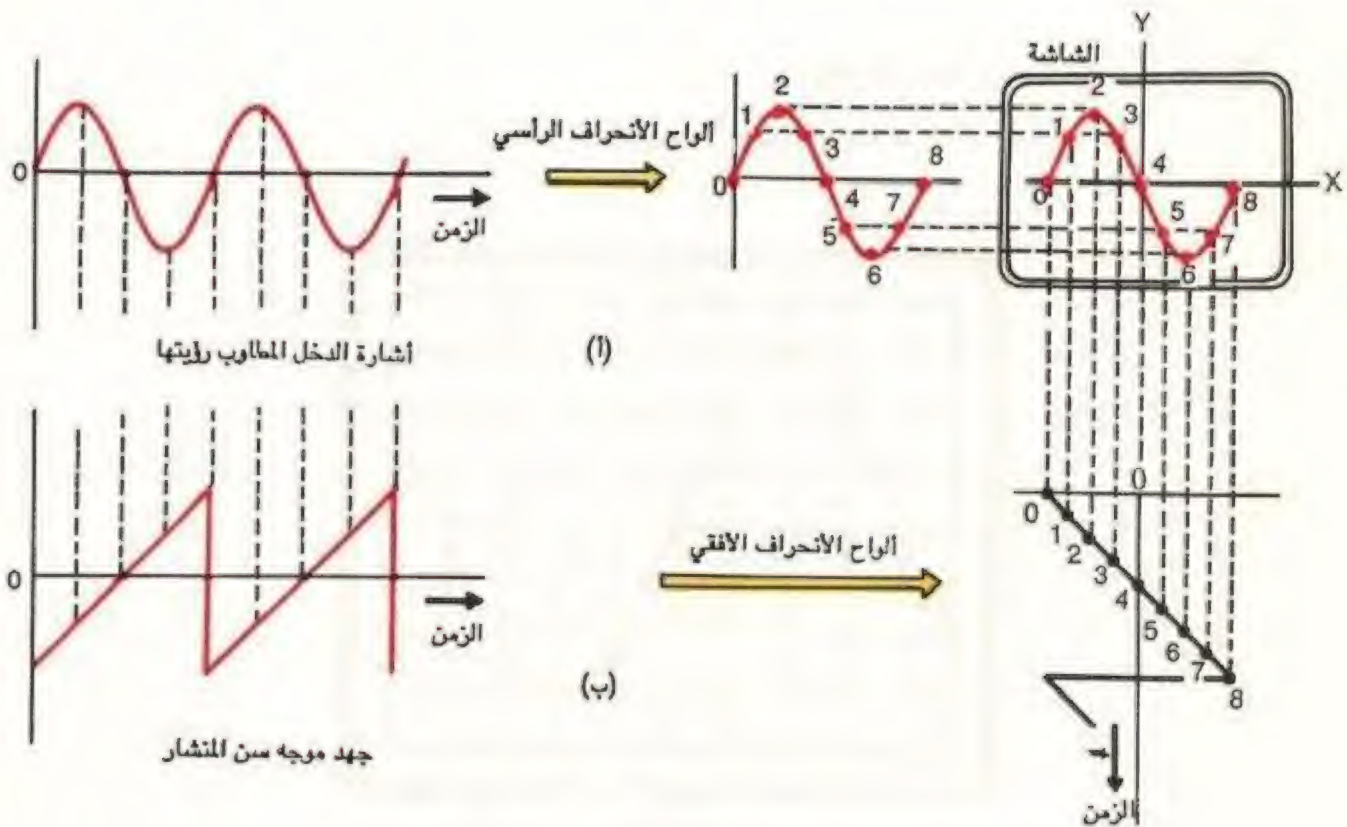
أنبوبة برون تسمى أيضاً أنبوبة أشعة المهبط (CRT) ، وهى صمام مفرغ يتكون من ثلاثة عناصر ، هي القاذف الإلكتروني ، وجزء الانحراف ، وشاشة فلورسنت . حيث يتكون القاذف الإلكتروني من المهبط الذى يقوم بتوليد الإلكترونات وأقطاب التعجيل لتعجيل اندفاع الإلكترونات مع توصيلهم بجهد عالٍ وأقطاب تركيز لعمل شعاع إلكتروني . وتتكون ألواح الانحراف من زوجين من الأقطاب . حيث يتحرك الشعاع الإلكتروني رأسياً وأفقياً طبقاً للجهد الواقع على أقطاب الانحراف ، وتنجذب الإلكترونات إلى الجهد الموجب وتتنافر مع الجهد السالب ، وتسمى هذه الأقطاب بألواح الانحراف الرأسية والأفقية . أما الشاشة الفلوروسنت فهى لوح من الزجاج مطلى بمادة فلوروسنتية ، تشع ضوء عند اصطدام الشعاع الإلكتروني بها ، وبالتالي تتكون نقطة ضوئية على الشاشة .

ج - دائرة الانحراف Deflection circuit

يقوم جزء التكبير الرأسى بتكبير أو تصغير إشارة الجهد الواقعة على نهايتي الدخل إلى المقدار المرئي على سطح الشاشة CRT . ويتم توصيل الخرج بألواح الانحراف الرأسى . في حين يقوم مذبذب المسح بتوليد موجة جهد سن المنشار التي تطبق على أقطاب الانحراف الأفقية . وتقف الموجة على الشاشة اذا كان تردد المذبذب الأفقى يكافئ عدد مرات صحيحة من تردد الإشارة الداخلة . وهذه العملية تسمى تزامن وتشمل تزامناً إجبارياً أو تزامناً إطلاق . ففي النوع الأول يتم ضبط تردد المذبذب يدوياً ، ولكن في النوع الثانى يتم التحكم في تردد المذبذب باستخدام إشارة الدخل . ويتم استخدام تزامن الإطلاق في راسمات الذبذبات الحالية لإظهار الإشارات ذات المدد الزمنية غير المنتظمة والإشارات المتفرقة ، ويشمل نظام الإطلاق تزامن إطلاق داخلي وآخر خارجي .

د- فكرة العمل

كما هو موضح بالشكل ٨ - ٣٣، عند توصيل إشارة جهد على ألواح الانحراف الرأسية وموجة سن المنشار على ألواح الانحراف الأفقية فيكون مكان تقاطعهما هو مسار النقطة .
وحيث إن انبوبة CRT لها خاصية اللمعان المستمر لمدة طويلة فإن مسار هذه النقطة يضع خطاً لامعاً لو تحركت هذه النقطة بسرعة كافية .



الشكل ٨ - ٣٣ شكل موجة على سطح شاشة CRT فلوروسنتية

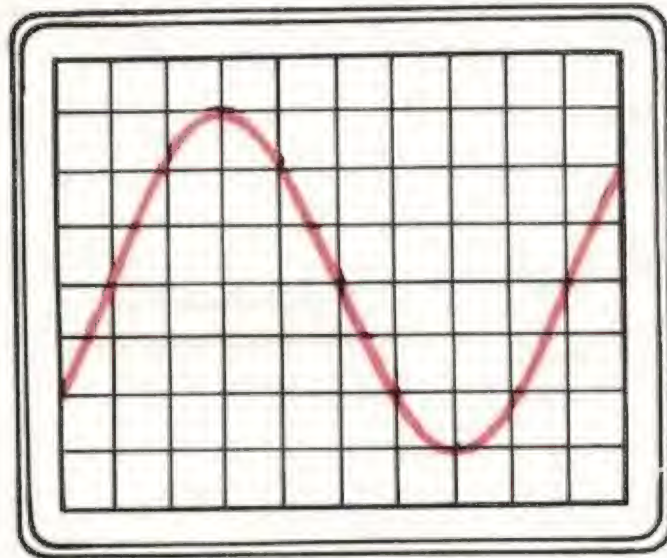
٨ - ٨ - ٢ قياس شكل موجة الإشارة

تحسب الحساسية الرأسية بمقدار الجهد [V / div] اللازم لانحراف الشعاع الرأسى
تدريج واحد على سطح الشاشة في الاتجاه الرأسى .

وزمن المسح [s / div] يقدر بالزمن اللازم لحركة النقطة في الاتجاه الأفقى تدريج واحد.
عندما يظهر شكل الموجة كما هو مبين بالشكل ٨ - ٢٤ تكون الحساسية الرأسية
0.5 V / div وزمن المسح 2ms / div والمعادلة التالية تعطي اقصى قيمة للجهد V_m والمدة
الزمنية T لإشارة الدخل :

$$V_m = 0.5 \times 3 = 1.5 \text{ V}$$

$$T = 2 \times 8 = 16 \text{ ms}$$



الحساسية الرأسية 0.5V/div
زمن المسح 2ms/div

الشكل ٨ - ٢٤ قياس شكل موجة الإشارة

سؤال ١٠

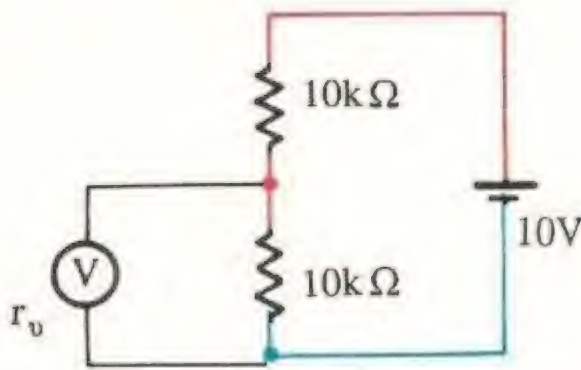
مع فرض أن شكل الموجة بالشكل ٨ - ٣٤ والحساسية الرأسية $2V / \text{div}$ وزمن المسح $0.5 \text{ ms} / \text{div}$ ، احسب القيمة القصوى، والقيمة الفعالة، والمدة الزمنية، والتردد لهذه الإشارة .

الحمد لله تعالى الذي تتم بنعمه الصالحات
لقد وفقت بتصوير النسخة اسكنر بصورة جديدة
وطباعة ممتازة

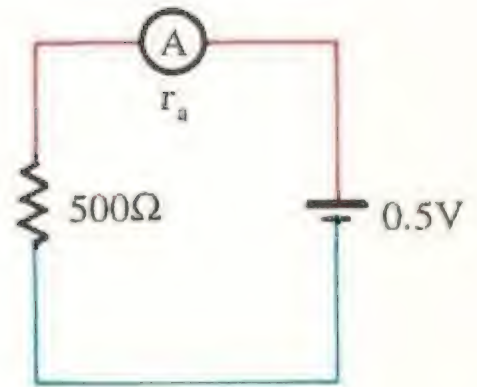
نسألكم الدعاء بظهر الغيب لي ولوالدي
اخوكم في الله أبو عبد الله عبد المهيمن فوزي

تمارين

- ١ - نفترض أن قياس الجهد باستخدام جهاز فولتميتر تصنيف 0.5 وله أقصى تدرّيج 300V ويبين المؤشر 100V . ماهو مدى القيمة الحقيقية ؟
- ٢ - مع فرض أن المقاومة الداخلية r_a لجهاز أميتر هي 50Ω في الدائرة الموضّحة بالشكل ٨ - ٣٥ ، اذكر القيمة المبينة بواسطة الأميتر ثم احسب مقدار الخطأ بالنسبة للحالة قبل توصيل الأميتر .
- ٣ - مع فرض الدائرة بالشكل ٨ - ٣٦ إذا قيست باستخدام ثلاث فولتميترات مقاومتهم الداخلية $10 \text{ k}\Omega$, $100 \text{ k}\Omega$, $1 \text{ M}\Omega$. حدد القيم المبينة بواسطة الفولتميترات ثم احسب الأخطاء بالنسبة للحالة قبل التوصيل .



الشكل ٨ - ٣٦



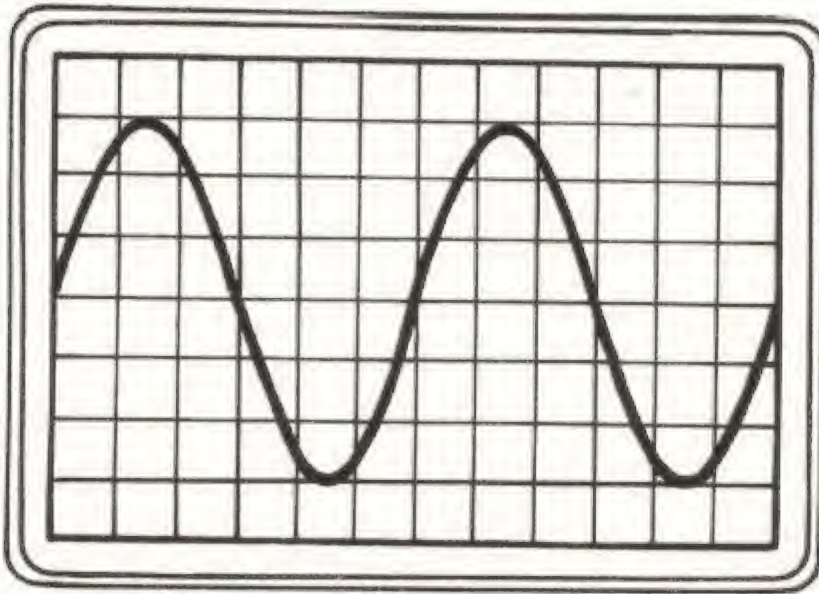
الشكل ٨ - ٣٥

٤ - بفرض أن المقاومة R_x تقاس باستخدام فولتميتر له مقاومة داخلية $r_v = 10k\Omega$ وجهاز أميتر له مقاومة داخلية $r_a = 50\Omega$ في الشكل ٨ - ٢٢ ، احسب الحالات الآتية :

(١) $V = 10\text{ V}$, $I = 2\text{m A}$ في الشكل ٨ - ٢٢ (١)

(٢) $V = 10\text{ V}$, $I = 2\text{m A}$ في الشكل ٨ - ٢٢ (ب)

٥ - موجه جييبية موضحة بالشكل ٨ - ٣٧ ظهرت على شاشة راسم الذبذبات عندما سلطت إشارة الدخل بالراسم . احسب القيمة القصوى ، والقيمة الفعالة ، والمدة الزمنية ، والتردد لإشارة الدخل عندما تكون الحساسية الرأسية 0.1 V / div وزمن المسح $5\mu\text{s / div}$.



الشكل ٨ - ٣٧

الحمد لله تعالى الذي تتم بنعمه الصالحات
لقد وفقت بتصوير النسخة اسكنر بصورة جديدة
وطباعة ممتازة

نسألكم الدعاء بظهر الغيب لي ولوالدي
اخوكم في الله أبو عبد الله عبد المهيمن فوزي

ملحق

التفاضل والتكامل

Differentiation and integration

يدرس التفاضل والتكامل ضمن مقررات أخرى . ومع ذلك سوف يساعد هذا الملحق هؤلاء ، الذين لم يقوموا بدراسة هذه المقررات .

التفاضل

في حالة تعريف المعادلة $f(x)$ عند النقطة التي يكون عندها $x = a$ ، فإنه يمكن التعبير عن القيمة الحدية كما يلي :

$$\alpha = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h}$$

وتسمى α معامل التفاضل للمعادلة $f(x)$ في حالة $x = a$. ويمكن أيضاً التعبير عن $\alpha \rightarrow f'(a)$ ومعامل التفاضل $f'(x)$ هو دالة في x ، ويمكن تعريفه في حدود المنطقة التي توجد فيها $f'(a)$.

وتسمى $f'(x)$ مشتقة $f(x)$ ، وتسمى عملية إيجاد $f'(x)$ بتفاضل $f(x)$.

وإذا كانت Δy هي نسبة الزيادة Δx في x ، وكان $y = f(x)$ ، فإن .

$$\Delta y = f(x + \Delta x) - f(x)$$

ويمكن التعبير عن المشتقة $f'(x)$ للمعادلة $y = f(x)$ كالتالي :

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

ويمكن أيضاً التعبير عن مشتقة $y = f(x)$ ، بالإضافة إلى $f'(x)$ كالتالي :

$$y' , \frac{dy}{dx} , \frac{d}{dx} f(x)$$

مثال

$$\frac{d}{dx} (ax + b) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\{ a(x + \Delta x) + b \} - (ax + b)}{\Delta x} = a \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \sin x &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\sin(x + \Delta x) - \sin x}{\Delta x} \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\cos\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right) \sin \frac{\Delta x}{2}}{\frac{\Delta x}{2}} = \cos x \quad (2) \end{aligned}$$

$$2 \cos \alpha \sin \beta = \sin(\alpha + \beta) - \sin(\alpha - \beta)$$

$$\alpha = x + \frac{\Delta x}{2} , \beta = \frac{\Delta x}{2}$$

حيث

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \cos x &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\cos(x + \Delta x) - \cos x}{\Delta x} \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{-\sin\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right) \sin \frac{\Delta x}{2}}{\frac{\Delta x}{2}} = -\sin x \quad (3) \end{aligned}$$

$$-2 \sin \alpha \sin \beta = \cos(\alpha + \beta) - \cos(\alpha - \beta)$$

$$\alpha = x + \frac{\Delta x}{2} , \beta = \frac{\Delta x}{2}$$

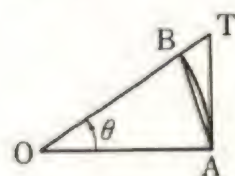
حيث

* إذا افترضنا أن $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ ، فإن الشكل OAB يبين قطاع دائرة مركزها O ونصف قطرها 1 ، حيث T هي نقطة تقاطع المماس عند A مع امتداد OB ، ويكون من الواضح أن :

$$\Delta OAB < OAB < \Delta OAT$$

$$\therefore \frac{1}{2} \sin \theta < \frac{1}{2} \theta < \frac{1}{2} \tan \theta$$

$$\sin \theta < \theta < \tan \theta$$



أي أن

وعندما تكون $\sin \theta > 0$ ، نقسم كلا الطرفين على $\sin \theta$ ، ونحصل على المقلوب

$$1 > \frac{\sin \theta}{\theta} > \cos \theta \quad \text{كالتالي :}$$

وإذا اعتبرنا أن θ هي 0 ، فإن $\cos \theta$ تصبح 1 .

$$\text{وكذلك } \frac{\sin \theta}{\theta} \text{ تصبح } 1 :$$

وإذا اعتبرنا أن $\theta = \frac{\Delta x}{2}$ ، وأن $\theta \rightarrow 0$ ، فإن $\Delta x \rightarrow 0$ ، وعليه يكون :

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\sin \frac{\Delta x}{2}}{\frac{\Delta x}{2}} = 1$$

مثال

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dx} \log_a x &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\log_a (x + \Delta x) - \log_a x}{\Delta x} \\
 &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \log_a \left(1 + \frac{\Delta x}{x} \right) \\
 &= \frac{1}{x} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{x}{\Delta x} \log_a \left(1 + \frac{\Delta x}{x} \right) \\
 &= \frac{1}{x} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \log_a \left(1 + \frac{\Delta x}{x} \right)^{\frac{x}{\Delta x}} ** \\
 &= \frac{1}{x} \log_a e = \frac{1}{x \log_e a} \quad (4)
 \end{aligned}$$

** القيمة الحدية لـ $\lim_{h \rightarrow 0} (1+h)^{\frac{1}{h}}$

وفيما يلي نتيجة حساب $h = 0.1, 0.01, 0.001, \dots$

وكذلك $h = -0.1, -0.01, -0.001, \dots$

وأيضاً $(1+h)^{\frac{1}{h}}$

h	$(1+h)^{\frac{1}{h}}$	h	$(1+h)^{\frac{1}{h}}$
0.1	2.593742.....	- 0.1	2.867971.....
0.01	2.704813.....	-0.01	2.731999.....
0.001	2.716923.....	-0.001	2.719642.....
0.0001	2.718145.....	-0.0001	2.718417.....

وإذا افترضنا أن ϵ هي القيمة الحدية لـ $\lim_{h \rightarrow 0} (1 + h)^{\frac{1}{h}}$

يمكن التعبير عن هذه القيمة الحدية كالتالي : $\epsilon = \lim_{h \rightarrow 0} (1 + h)^{\frac{1}{h}}$

حيث ϵ هي عدد غير منطقي ، وتكون القيمة 2.718281

وفي حالة $h \rightarrow 0$ ، $h = \frac{\Delta x}{x}$

فإن $\Delta x \rightarrow 0$ ($x \neq 0$)

وعليه فإن $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(1 + \frac{\Delta x}{x} \right)^{\frac{x}{\Delta x}} = \epsilon$

تفاضل الدوال العكسية Inverse Functions

هنا سنقوم بالحصول على تفاضل الدالة العكسية $g(x)$ من $f(x)$ ، في حالة $y = g(x)$ ،
وعليه $x = f(y)$.

عند إجراء تفاضل للطرفين يصبح الطرف الأيمن كالتالي :

$$\frac{d}{dx} f(y) = \frac{d}{dy} f(y) \cdot \frac{dy}{dx} = f'(y) \frac{dy}{dx}$$

$$1 = f'(y) \frac{dy}{dx}$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{f'(y)} = \frac{1}{\frac{dx}{dy}} \quad \text{وعليه :}$$

$$\frac{dx}{dy} \neq 0 \quad \text{حيث :}$$

$$\frac{dy}{dx} = g'(x) = \frac{1}{f'(g(x))} \quad \text{أو}$$

مثال

$$x = \log_a y, \quad \frac{dx}{dy} = \frac{1}{y \log_e a} \quad \text{عندما تكون } y = a^x \text{ فإن}$$

وعليه فإن :

$$\frac{d}{dx} a^x = y \log_e a = a^x \log_e a \quad (5)$$

وفي حالة $a = e$ فإن :

$$\frac{d}{dx} e^x = e^x \log_e e = e^x \quad (6)$$

تفاضل المعادلات الهجينة (المختلطة) Hybrid equations

إذا كان من الممكن إجراء تفاضل لـ $u = g(x)$ ، $y = f(u)$ وكانت Δx هي الزيادة في

x ، Δu هي الزيادة في u ، Δy هي الزيادة في y ، فإن :

$$\Delta u = g(x + \Delta x) - g(x)$$

$$\Delta y = f(g(x + \Delta x)) - f(g(x)) = f(u + \Delta u) - f(u)$$

وعندما $\Delta x \rightarrow 0$ فإن $\Delta u \rightarrow 0$ ، ويكون :

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta u} = \lim_{\Delta u \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{dy}{du}$$

وعليه فإن

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta u} \frac{\Delta u}{\Delta x} = \lim_{\Delta u \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta u} \cdot \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} \\ &= \frac{dy}{du} \cdot \frac{du}{dx} \end{aligned}$$

مثال

عندما تكون $\omega t = u$

$$\frac{du}{dt} = \omega \quad \text{فإن (1) فمن المعادلة}$$

وعليه فإن :

$$\frac{d}{dt} \sin \omega t = \omega \cos \omega t \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \cos \omega t = \omega (-\sin \omega t) = -\omega \sin \omega t \quad (8)$$

وفي حالة $kt = u$ ، $\frac{du}{dt} = k$ فإن

$$\frac{d}{dt} e^{kt} = k e^{kt} \quad (9)$$

التكامل

على التباين من $f(x)$ ، إذا كان $F'(x) = f(x)$ ، فإننا نسمى المعادلة $F(x)$ بالتكامل غير المحدد .

وإذا أمكن إيجاد التكامل غير المحدد $F(x)$ لـ $f(x)$ ، يمكن التعبير عنه كالتالي : $\int f(x) dx$

وعندما يكون $F(x)$ هو التكامل غير المحدد لـ $f(x)$ ، يكون التكامل غير المحدد هو

$$\int f(x) dx = F(x) + C$$

حيث C هو ثابت التكامل .

وعندما نحصل على نتيجة من التكامل غير المحدد لـ $f(x)$ ، فإن ذلك يسمى بالتكامل .

مثال

من المعادلات (7) ، (8) ، (9)

$$\int \sin \omega t dt = -\frac{1}{\omega} \cos \omega t + C \quad (10)$$

$$\int \cos \omega t dt = \frac{1}{\omega} \sin \omega t + C \quad (11)$$

$$\int e^{kt} dt = \frac{1}{k} e^{kt} + C \quad (12)$$

وفي حالة $\cos 2 \alpha = 1 - 2 \sin^2 \alpha$

$$\sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2 \alpha}{2} \quad \text{و}$$

$$\alpha = \omega t \quad \text{و}$$

من المعادلة (1) يكون $\frac{d}{dt} t = 1$

ومن المعادلة (7) يكون $2\omega t = u$ وعليه يكون $\frac{du}{dt} = 2 \omega$

$$\frac{d}{dt} \sin 2 \omega t = 2 \omega \cos 2 \omega t \quad \text{ويكون}$$

وعليه فإن

$$\begin{aligned} \int \sin^2 \omega t \, dt &= \int \frac{1 - \cos 2 \omega t}{2} \, dt = \frac{1}{2} \int dt - \frac{1}{2} \int \cos 2 \omega t \, dt \\ &= \frac{1}{2} t - \frac{1}{4 \omega} \sin 2 \omega t + C \end{aligned} \quad (13)$$

وإذا كانت $F(x)$ هي تكامل غير محدد لـ $f(x)$ ، فإن :

$$\int_a^b f(x) \, dx = F(b) - F(a)$$

ويسمى هذا بالتكامل المحدد لـ $f(x)$ من a إلى b .

مثال للتكامل المحدد

$$\int_0^T \sin^2 \omega t \, dt = \frac{1}{2} (T - 0) - \frac{1}{4 \omega} (\sin 2 \omega t - \sin 0) = \frac{1}{2} T \quad (14)$$

ملحق المصطلحات الفنية

A

absolute value	القيمة المطلقة
active	فعال
actuator	المحث (المحفز)
A-D converter	المحول التمثيلي / الرقمي
admittance	السماحية
allowable	مسموح به
alkali (alkaline)	قلوي
alternating current (AC)	تيار متغير (متردد)
ammeter	اميتير (مقياس التيار)
ampere	امبير
amplification	تكبير
amplifier	مكبر
analogue tester	جهاز الاختبار التمثيلي
angular velocity	السرعة الزاوية
anode	أنود - مصعد
apparent	ظاهري

Arago's disk	قرص أراجو
argument	ازاحة زاوية
atom	ذرة
attraction	جذب
autotransformer	المحول الذاتي
avo - meter	اقوميتير

B

back coupling	ازدواج خلفي
battery	بطارية
bimetal	معدن مزيج
binary number	عدد ثنائي
biopolar	ثنائي القطب
Biot - Savart's law	قانون بيوت سافارت
bridge circuit	دائرة القنطرة
Braun tube	أنبوبة برون

C

capacitor	مكثف
capacity	سعة

cathode	كاثود - مهبط
cell	خلية
characteristic	خاصية
charging current	تيار الشحن
coating	طلاء
coil	ملف
collector	مجمع
computer	حاسوب
control	تحكم
core	قلب الملف
Coulomb's law	قانون كولوم
complex	مركب
complex numbers	الأعداد المركبة
conductivity	التوصيلية النوعية
conductor	موصل
connection	توصيل
contact	تلامس
conversion	تحويل
corona discharge	التفريغ التاجي
correction	تصحيح

counter	عداد
CPU (central processing unit)	وحدة المعالجة المركزية
CRT	وحدة العرض (الشاشة) - صمام اشعة المهبط
crystal	بلورة
current	تيار
cylindrical	اسطواناني

D

D-A converter	المحول الرقمي / التمثيلي
DC circuits (Direct current)	دوائر التيار المستمر
deflection	انحراف
degree	درجة
density	كثافة
differential circuit	دائرة تفاضلية
differentiation	التفاضل
digital meter	جهاز القياس الرقمي
digital tester	جهاز الاختبار الرقمي
direct current	تيار مستمر
diode	ثنائي
discharge	التفريغ
distortion	تشويه

E

earth magnetism	المغناطيسية الأرضية
eddy current	التيار الدوامي
effective	فعال
electrification	التكهرب
electrolytic solution	محلول الكتروليتي
electromotive force	القوة الدافعة الكهربائية
electron	الالكترون
electronic circuit	دائرة إلكترونية
electrostatic	كهروستاتيكي
energy	طاقة
equivalent circuit	دائرة مكافئة
error	خطأ

F

factor	معامل
Faraday's law	قانون فارادي
feedback	التغذية الراجعة
field	مجال
field effect transistor (FET)	ترانزستور تأثير المجال

Fleming's left hand rule	قاعدة اليد اليسرى لفلمنج
Fleming's right hand rule	قاعدة اليد اليمنى لفلمنج
fluorescent lamp	مصباح فلوروسنت
flux	فيض
force	قوة
forward voltage	جهد أمامي
frequency	التردد
frictional electricity	كهرباء الاحتكاك
fuel cell	الخلية التي تعمل بالوقود
full - adding circuit	دائرة الجمع الكلي
full wave	موجة كاملة

G

gain	الكسب
galvanometer	جلفانومتر
generator	مولد
grounding	أرضي (الطرف الأرضي)

H

half - adding circuit	دائرة الجمع النصفية
-----------------------	---------------------

half wave	نصف موجة
Hall device	جهاز هول
harmonic	توافقية - توافقي
heat	حرارة
hexadecimal numbers	اعداد ست عشرية
h - parameter	معامل h
hybrid equations	المعادلات الهجينة (المختلطة)
hysteresis loop	حلقة التخلف المغناطيسي (الهستيرسيس)

I

imaginary	تخيلي
impurity	شائبة
indicating instruments	أجهزة البيان
inductance	محاثة
induction	حث
instantaneous	لحظي
insulation	عزل
integrated circuit (IC)	الدائرة المتكاملة
integration	التكامل
intensity	شدة - قوة

interface	نظام المواجهة
intrinsic	ذاتي
inverse functions	الدوال العكسية
ion	ايون

J

JIS (Japanese Industrial Standards)	المواصفات الصناعية اليابانية
Joule	چول

K

Kirchoff's first law	القانون الأول لكيرشوف
----------------------	-----------------------

L

leakage transformer	محول التسرب
Lenz's law	قانون لنز
light emission	باعث للضوء
limit switch	مفتاح الحد
load	الحمل
logic circuit	دائرة منطقية
LSI (large scale integrated circuits)	الدوائر المتكاملة كبيرة المدى

M

magnet	مغناطيس
magnetism	مغناطيسية
magnetomotive force	القوة الدافعة المغناطيسية
measuring instruments	أجهزة قياس
meter	جهاز قياس
mistake	خطأ
motor	محرك
moving - coil type	نوع الملف المتحرك
multi - stage	متعدد المراحل
mutual induction	الحث المتبادل

N

non - sinusoidal	غير جيبي
------------------	----------

O

Ohm's law	قانون أوم
operational amplifier	مكبر التشغيل
oscillation	ذبذبة

oscilloscope

راسم الذبذبات

P

parallel connection

توصيل على التوازي

Peltier effect

تأثير بلتيير

period

زمن الدورة (مدة)

permeability

نفاذية

phase

الطور - الوجه

phenomenon

ظاهرة

photoconductive cell

خلية ضوئية موصلة

phototransistor

الترانزستور الضوئي

plane

مستوى

pointer - type

نو مؤشر متحرك

polar co-ordinates

الأحداثيات القطبية

pole

قطب

potential difference

فرق الجهد

power

قدرة

precipitation

ترسيب

precision

دقة

pressure

ضغط

pulse motor

محرك نبضي

Q

quantity

كمية

quotient - meter type

جهاز قياس من النوع المقسوم

R

RAM (random access memory)

ذاكرة الوصول العشوائي

rectangular co-ordinates

الاحداثيات المتعامدة

rectifier

مقوم

rectifying circuit

دائرة تقويم

regulator

منظم

relative permeability

السماحية النسبية

relay

مرحل

reluctance

ممانعة (مقاومة)

resistance

مقاومة

resistivity

المقاومة النوعية

resistor

مقاوم

resonance

رنين

reverse voltage

جهد عكسي

revolving	دوار
robot	الإنسان الآلي
ROM (read only memory)	ذاكرة القراءة فقط

S

Seebeck effect	تأثير سيبك
self induction	حث ذاتي
semiconductor	شبه موصل
sensitivity	حساسية
sensor	جهاز إحساس (مجس)
sequencer	المعالج المتتابع
sequential control	التحكم المتتابع
series connection	توصيل على التوالي
servomotor	محرك السيرفو
shield	حاجب
signal level	مستوى الإشارة
sinusoidal wave	موجة جيبية
smoothing circuit	دائرة تنعيم
solar cell	الخلية الشمسية
solenoid	سولينويد (ملف لولبي)

spark discharge	تفريغ الشرارة
spot welding	لحام النقطة
square wave	الموجة المربعة
static	ساكن
strength	شدة - قوة
super conductivity	التوصيلية الفائقة
symbol	رمز
synchronous speed	السرعة المتزامنة
system	نظام

T

temperature	درجة الحرارة
thermo - ammeter	الأميتر الحراري
thermocouple	ازدواج حراري
thermoelectric	كهروحراري
thermometer	ترمومتر
three phase AC	التيار المتغير ثلاثي الأوجه
thyristor	ثايرستور (مقاومة حرارية)
transformer	محول (ترانسفورمر)
transient	عابر

transistor	ترانزستور
truth table	جدول القيم المنطقية
tuned	متوالف

U

unit	وحدة
------	------

V

vacuum discharge	التفريغ في الفراغ
valence	تكافؤ
variable	متغير
vector	متجه
vibrating reed	ريشة هزازة (رنانة)
volt	فولت
voltaic cell	الخلية الفولتية
voltage	جهد
voltmeter	مقياس الجهد

W

watt	وات
------	-----

wattmeter

مقياس القدرة

waveform

شكل موجي

Wheatstone bridge

قنطرة هويتستون

الحمد لله تعالى الذي تتم بنعمه الصالحات
لقد وفقت بتصوير النسخة اسكنر بصورة جديدة
وطباعة ممتازة

نسألكم الدعاء بظهر الغيب لي ولوالدي
اخوكم في الله أبو عبد الله عبد المهيمن فوزي

Handwritten text in the top left corner, possibly a date or page number.

Handwritten text in the top right corner, possibly a title or subject.

